

# ПРИРОДА

9 13



**В НОМЕРЕ:**

- 3** **Сажин М.В., Сажина О.С.**  
**Космическая миссия «ПЛАНК»:  
 предварительные результаты**  
*Спутник «ПЛАНК» в течение полутора лет исследовал анизотропию реликтового излучения. Хотя обработка результатов еще продолжается, уже можно считать, что Стандартная модель Вселенной достоверно подтверждена.*

- 10** **Елисеев А.В.**  
**Взаимодействие климата  
 и экосистем: исследования  
 на стыке наук**  
*Климат способен определять состояние экосистем, а те, в свою очередь, могут влиять на различные компоненты климата. Все процессы этого взаимодействия условно подразделяются на биогеохимические и биогеофизические.*

- 17** **Бялко А.В.**  
**Спектры возмущений  
 климатической системы**  
*Есть несколько обновляемых рядов данных, описывающих современный климат. Их корреляционный и спектральный анализ позволяет сделать выводы о взаимозависимости температуры и концентрации диоксида углерода.*

- 27** **Портнов А.М.**  
**Секреты золотого гиганта**  
*По мере изучения знаменитого южноафриканского золоторудного месторождения возникали вопросы, на которые не было ответов. В геологической литературе даже появился термин: «загадки Витватерсранда». Попытаемся их разгадать.*

- 33** **ПЛАНЕТА БАКТЕРИЙ**  
 К 80-летию со дня рождения академика Г.А.Заварзина

**Бонч-Осмоловская Е.А.**

**Новые термофильные  
 прокариоты (34)**

**Дедыш С.Н., Серкебаева Ю.М.**

**Ацидобактерии — неизвестные  
 доминанты наземных экосистем (42)**

**Заварзина А.Г., Заварзин А.А.**

**Гумус в ранних  
 наземных экосистемах (49)**

**Заварзина Д.Г.**

**Железоредукторы содовых озер —  
 реликты «железного века»? (59)**

- 68** **Глушков В.В.**  
**Японское (Восточное) море —  
 акватория противоречий**

**Научные сообщения**

- 75** **Сагалевиц А.М.**  
**Глубоководный обитаемый аппарат  
 «Яолонг»**

**Заметки и наблюдения**

- 77** **Горбунов А.П., Горбунова И.А.**  
**Чарынские каньоны**

- 83**  
**Конгресс Федерации европейских  
 биохимических обществ 2013  
 «Биологические механизмы»**  
 Интервью с А.Г.Габибовым

- 90** **Новые книги**

**В конце номера**

- 93** **Уфимцев Г.Ф.**  
**Камнерезное искусство в Китае**

## CONTENTS:

### 3 **Sazhin M.V., Sazhina O.S.** **Space Mission «PLANK»: Preliminary Results**

*Orbital observatory «PLANK» has been studying anisotropy of relict radiation for year and a half. While processing of the data still continues, we could already conclude that the Standard Model of Universe has been reliably corroborated.*

### 10 **Eliseev A.V.** **Interaction of Climate and Ecosystems: Cross-disciplinary Research**

*Climate can determine the states of ecological systems, and these systems can in their turn influence different components of climate. All processes of these interactions for convenience are categorized as biogeochemical and biogeophysical.*

### 17 **Byalko A.V.** **Spectra of Climate System Perturbations**

*There are several continuously updated series of data describing modern climate. Their correlation and spectral analysis allows derive conclusions about interdependence of temperature and carbon dioxide concentration.*

### 27 **Portnov A.M.** **Secrets of Golden Giant**

*In the course of exploration of the famous South African gold field few questions without answers arose. Even a term «riddles of Witwatersrand» emerged in geological literature. Let us try to resolve them.*

### 33 **THE PLANET OF BACTERIA**

To 80th Anniversary of Academician  
G.A.Zavarzin

#### **Bonch-Osmolovskaya E.A.** **New Thermophilous Procaryotes (34)**

#### **Dedysh S.N., Serkebaeva Yu.M.** **Acidobacteria: Unknown Dominants of Terrestrial Ecosystems (42)**

#### **Zavarzina A.G., Zavarzin A.A.** **Humus in Early Terrestrial Ecosystems (49)**

#### **Zavarzina D.G.** **Iron Reducers of Soda Lakes: Relicts of «Iron Age»? (59)**

### 68 **Glushkov V.V.** **Japanese (East) Sea: a Basin of Contradictions**

#### **Scientific Communications**

### 75 **Sagalevich A.M.** **Deep-water Manned Submersible «Yaolong»**

#### **Notes and Observations**

### 77 **Gorbunov A.P., Gorbunova I.A.** **Charyn Canyons**

### 83 **Federation of European Biochemical Societies Congress 2013 «Mechanisms in Biology»** Interview with A.G.Gabibov

### 90 **New Books**

#### **In the End of the Issue**

### 93 **Ufimtsev G.F.** **Stone Cutting Art in China**

# Космическая миссия «ПЛАНК»: предварительные результаты

М.В.Сажин, О.С.Сажина

**К**осмический радиотелескоп «ПЛАНК» («PLANCK») был построен и запущен в космос с целью исследовать анизотропию реликтового излучения. Прежде чем объяснить, почему эти наблюдения так важны для космологии, необходимо сказать несколько слов о самом реликтовом излучении.

## Свидетель глубокого прошлого

Уникальность *реликтового излучения* заключается в том, что внутри его источника находятся все наблюдатели во Вселенной. Любой наблюдатель находится в центре шара, ограниченного сферической поверхностью, откуда к нему и приходит реликтовое излучение. Эта граница — сферическая поверхность последнего рассеяния, которая практически совпадает с космологическим горизонтом частиц, ограничивающим видимую нам часть Вселенной. Радиус этой поверхности огромный, примерно 15 Гпк, с таких расстояний фотоны летят миллиарды лет. Поэтому она лежит в далеком прошлом нашей Вселенной, когда та была очень молода и горяча. Как известно из термодинамики, все тела с расширением охлаждаются. Расширяясь по инерции, заполненная



**Михаил Васильевич Сажин**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова.



**Ольга Сергеевна Сажина**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института.

Область научных интересов авторов — космология, теория относительности, астрометрия.

горячей плазмой Вселенная охладилась. В плазме в термодинамическом равновесии находились протоны, электроны и другие элементарные частицы. Одной из таких частиц был фотон. Наступил момент, когда плазма остыла настолько, что излучение оказалось отделенным от вещества: свободные протоны и электроны стали связываться в устойчивые атомы водорода, а фотоны — распространяться свободно. Вот этот момент (момент рекомбинации, или эпоха просветления) и зафиксирован на поверхности последнего рассеяния — появление первых свободно распространяющихся реликтовых фотонов, сечение взаимодействия которых с образовавшимся нейтральным водородом стало пренебрежимо мало. В начале своего путешествия их температура была очень высокой, примерно 3000 К, во время расширения Вселенной фотоны остывали, и сейчас Вселенная практически однородно заполнена микроволновым



реликтовым фоновым излучением с температурой порядка 3 К. Такая разница температур обусловлена тем, что Вселенная успела расшириться, увеличив свой размер примерно в 1000 раз.

Важнейшим наблюдательным фактом стало открытие небольшой *анизотропии реликтового излучения* (неоднородности его распределения по небесной сфере порядка всего лишь долей процента от основного фона). Эта анизотропия несет важнейшую информацию об устройстве Вселенной вплоть до моментов времени, соответствующих красному смещению  $z = 1000$  (напомним, что самые далекие источники — ранние галактики — находятся от нас на расстояниях порядка  $z = 8$ ) и даже еще дальше, до планковских времен и энергий. Полученные пока данные подтверждают так называемую Стандартную космологическую модель\*, основу современной космологии, в разработке которой приняли большое участие советские и российские космологи: Я.Б.Зельдович, А.Д.Линде, В.А.Рубаков, А.А.Старобинский и др. Наблюдения анизотропии позволяют теоретикам работать над созданием Единой теории и отсеивать нежизнеспособные модели. О параметрах и характерных свойствах этой модели в свете анализа реликтового излучения речь пойдет ниже.

Механизм возникновения анизотропии реликтового излучения прост и нагляден. Удобнее всего ее представить как совокупность колебательных гармоник. Само исходное реликтовое излучение можно рассматривать как монопольную гармонику (имеющую однородное распределение по сфере). Самая низшая гармоника анизотропии, дипольная, обусловлена тем, что наблюдатель, находясь внутри поверхности последнего рассеяния, движется относительно нее. Из-за эффекта Доплера у фотонов реликтового излучения, догоняющих наблюдателя, длина волны смещена в красную сторону спектра, а у движущихся навстречу — в голубую. Далее, поверхность последнего рассеяния «дрожит», совершает колебательные движения, порождая колебания более высоких мультиполей.

Помимо этих колебаний есть еще несколько физических механизмов генерации анизотропии. Основные из них: эффект Сакса—Вольфе, возникающий при распространении фотона в неоднородном статическом гравитационном поле — при движении в сторону нарастания гравитационного потенциала фотон теряет энергию, испытывает красное смещение, и при движении по убывающему потенциалу, при «скатывании», фотон приобретает энергию и его длина волны смещается в голубую часть спектра; интегральный эффект Сакса—

Вольфе, аналогичный эффекту Сакса—Вольфе, но возникающий в переменных гравитационных полях; эффект Силка, порождаемый адиабатическими флуктуациями плотности, — флуктуация плотности материи приводит к флуктуации числа фотонов, т.е. где больше плотность, там горячее [2]. Для одного фотона описанные физические механизмы ведут к изменению частоты, для ансамбля реликтового излучения — к изменению температуры. Так, «ПЛАНК» измерил колебания вплоть до 2500-й гармоники, что соответствует очень малой «колеблющейся зоне» на небе, всего  $0.07^\circ$ , в то время как дипольная гармоника характеризует область размером в  $90^\circ$ .

Перед тем как говорить о самом проекте «ПЛАНК», необходимо вспомнить, какие аппараты по исследованию анизотропии реликтового излучения работали до него. Анизотропия была обнаружена в 1992 г. в результате обработки данных советского космического эксперимента «Реликт» [1]. Позже это открытие было надежно подтверждено американским аппаратом «COBE» и далее целой серией как наземных, так и космических миссий. Из последних следует прежде всего сказать о миссиях «WMAP» и «ПЛАНК». На аппарате «Реликт» был установлен всего один радиометр; отношение сигнала к шуму у него было невелико, порядка 3. На аппарате «COBE» измерения вели три радиометра, что позволило искать сигнал уже на трех независимых частотах; отношение сигнала к шуму было порядка 10. За открытие анизотропии реликтового излучения команда «COBE» была удостоена Нобелевской премии по физике в 2006 г.

Американским космическим аппаратом «WMAP» за девять лет наблюдений была получена важнейшая информация об анизотропии реликтового излучения. Удалось сформировать довольно четкую космологическую картину как качественную, так и количественную. Спутник «ПЛАНК» во многом подтвердил результаты «WMAP», а также смог дать более четкие ограничения на существующее многообразие теоретических моделей ранней Вселенной, на ее структуру и основные параметры. Результаты обработки данных были представлены в виде зависимости углового спектра анизотропии от мультипольного числа [1]. По виду этого спектра, по положению и амплитуде его пиков можно судить о величинах космологических параметров и, следовательно, о глобальных физических характеристиках нашей Вселенной.

## Новый взгляд нового спутника

Спутник «ПЛАНК» (рис.1) принадлежит Европейскому космическому агентству. Он предназначен для исследования ранней Вселенной, а именно для анализа микроволнового фонового реликтового излучения. Спутник был запущен 14 мая 2009 г.

\* О планковских временах и энергиях, а также подробно о процессах, происходивших в ранней Вселенной, можно прочитать в монографии С.Вайнберга [1], в учебнике Д.С.Горбунова и В.А.Рубакова [2], а также в популярной книге [3].

Высота спутника 4,20 м, ширина — 4,22 м, масса — 1,95 т, размеры зеркала — 1,9×1,5 м. Расчетное время жизни было оценено в 15 мес. В настоящее время спутник в нерабочем состоянии движется по эллиптической орбите. Операционная орбита — фигура Лиссажу, на среднем расстоянии от точки Лагранжа L2 в 400 000 км (рис.2). Окрестности точки Лагранжа L2 очень удобны для размещения космических аппаратов. Заметим, что идея отправлять космические миссии именно в эту точку принадлежала советским специалистам — идея оказалась настолько удачной, что, как шутят ученые, скоро в этой точке придется размещать светофор для регулирования становящегося все более интенсивным движения.

«ПЛАНК» — многочастотный инструмент. Он обладает двумя наборами радиоприемников. Доступный диапазон частот у 22 бортовых радиометров: 27—77 ГГц (что соответствует длинам волн от 11,1 до 3,9 мм) для низких частот (LFI). Регистрируемые частоты у имеющихся на борту 52 болометрических детекторов: 84 ГГц—1 ТГц (что отвечает длинам волн от 3,6 до 0,3 мм) для высоких частот (HFI).

Коротко остановимся на истории самого проекта. В 1993 г. на о.Капри (Италия) состоялась большая международная конференция, посвященная анизотропии реликтового излучения. На ней присутствовали основные участники этого эпохального открытия: И.А.Струков, М.В.Сажин, Дж.Смут. На волне энтузиазма и в силу исключительной важности новых данных для космологии европейская сторона предложила сразу два будущих больших проекта по исследованию анизотропии: «COBRAS» и «SAMBA». Последующее объединение этих проектов и породило европейский — франко-итальянский — эксперимент «ПЛАНК», в составе которого были ученые из Болонского университета (Istituto di



Рис.1. Космический аппарат «ПЛАНК».



Рис.2. Траектория аппарата «ПЛАНК» при выходе на расчетную орбиту.



Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica) в Италии и из французских университетов г. Орсе и Парижа (Institute d'Astrophysique Spatiale d'Orsay, Institute d'Astrophysique de Paris).

В марте 2013 г. сотрудники коллаборации «ПЛАНК» опубликовали в открытой печати предварительные результаты обработки данных — около 30 статей, посвященных различным космологическим и астрофизическим аспектам. Так, были построены карты космического микроволнового фона, карты Млечного Пути, карты распределения далеких внегалактических источников, каталоги компактных источников нашей и других галактик.

Важнейшей частью обработки данных было распознавание факторов разной природы, дающих вклад при построения карты фонового микроволнового излучения. Наблюдения на разных частотах позволили «отфильтровать» значительную часть синхротронного излучения, идущего от нашей Галактики (его интенсивность обратно пропорциональна кубу частоты), а также так называемое свободно-свободное излучение электронов. И наконец, было отделено излучение пыли. Обработанная (синтезированная) карта реликтового излучения представлена на рис.3.

Карта (проекция Мольвейде небесной сферы) была построена в системе «HEALPix» (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization). Система позволяет разбивать небесную сферу на зоны (пиксели и группы пикселей) одинаковой площади и перенумеровывать их удобным для дальнейшей обработки способом. Особенно эффективна она

для обработки больших массивов данных. Так, для спутника «WMAP» количество пикселей составляло 3 млн, а для аппарата «ПЛАНК» — уже 50 млн.

По синтезированной карте реликтового излучения был построен угловой спектр анизотропии (рис.4). При малых значениях мультиполей в данных как «WMAP», так и «ПЛАНК» наблюдается отклонение теоретической модели от реальных наблюдательных данных. Это различие носит название *cosmic variance*. Основное объяснение такого несоответствия заключается в том, что для каждого конкретного наблюдателя излучение поверхности последнего рассеяния характеризует какую-то одну конкретную реализацию случайного поля, которым была заполнена ранняя Вселенная (например, в простейших моделях — поля так называемого инфлатона, ответственного за инфляционную стадию ранней Вселенной), а потому, очевидно, меняется в зависимости от положения наблюдателя. Эту статистическую неопределенность можно было бы устранить только в том случае, если бы мы имели возможность наблюдать поверхность последнего рассеяния из множества точек, отстоящих друг от друга на большие (космологические) расстояния, что, к сожалению, невозможно. Еще одно вероятное объяснение — нетривиальная топология нашей Вселенной, хотя данные «ПЛАНК» практически исключили такие интересные и экзотические варианты, как многогранность (додекаэдр с отождествленными гранями) или тороидальность Вселенной на сверхбольших масштабах. Существует, наконец, объяснение

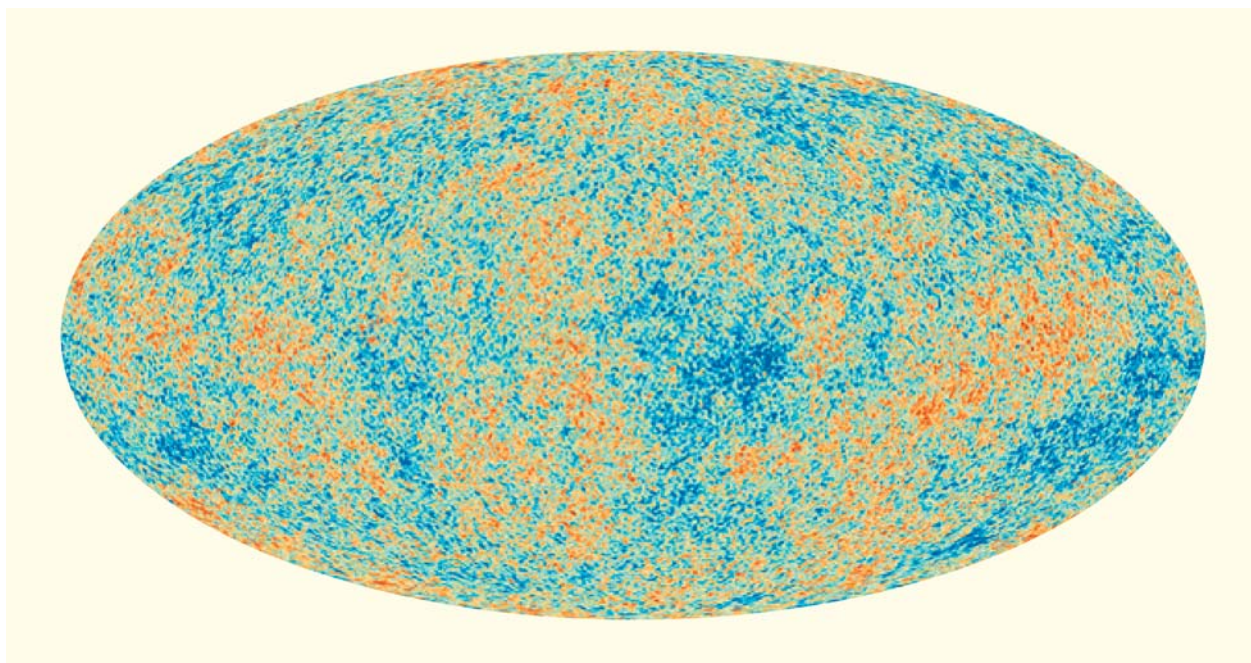


Рис.3. Карта микроволнового реликтового излучения, полученная в результате многочастотной обработки данных аппарата «ПЛАНК».

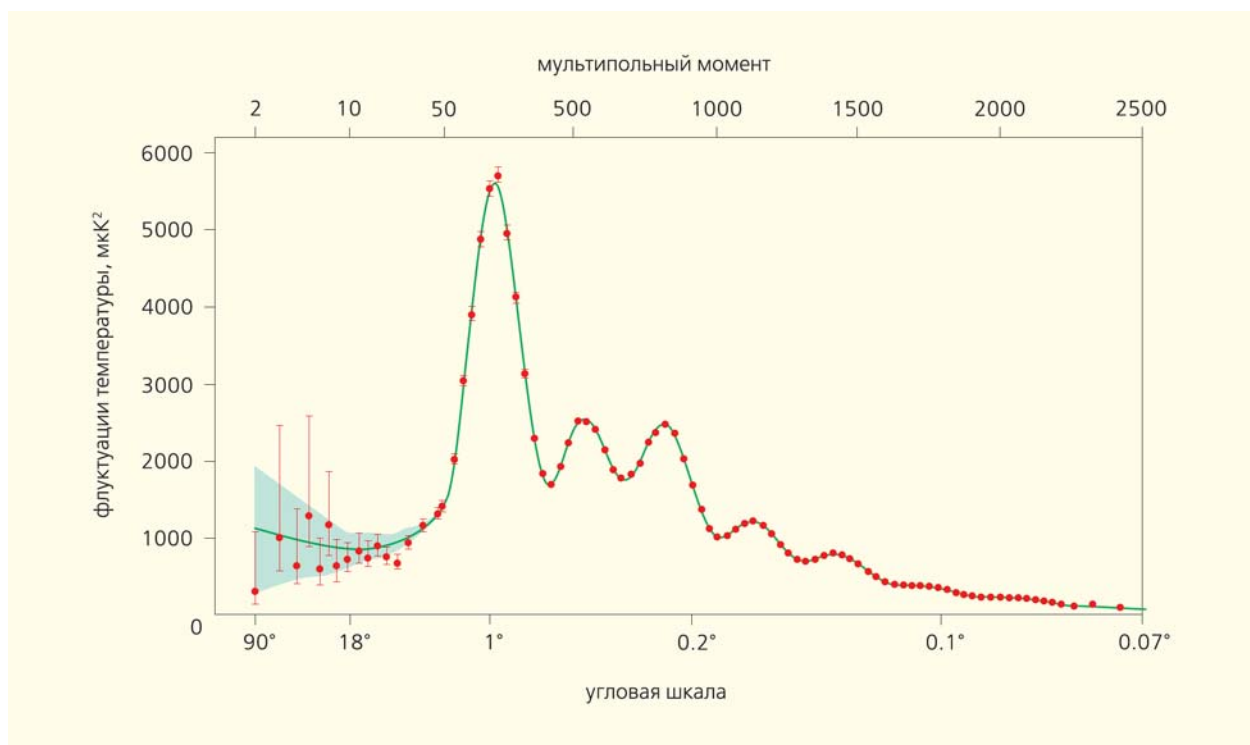


Рис.4. Угловой спектр анизотропии реликтового излучения, полученный аппаратом «ПЛАНК». Спектр показан в виде зависимости амплитуды «колебаний» поверхности последнего рассеяния от мультипольного числа и представляет собой разложение сигнала по сферическим функциям. По вертикальной оси отложены нормированные подходящим образом вращательно инвариантные величины мультиполей. Нормировка выбрана таким образом, чтобы подчеркнуть наличие плато Харрисона—Зельдовича для низких мультиполей. Непрерывная кривая — теоретическая Стандартная космологическая модель (ΛCDM). Точки — наблюдательные данные. Важно отметить точное согласование модели и данных наблюдений при больших мультиполях.

такого несоответствия теории с помощью топологических дефектов, прежде всего космических струн, о которых речь впереди.

### Коротко о главном

Из большого количества результатов, полученных в ходе предварительной обработки данных, можно выделить несколько наиболее важных.

Во-первых, была подтверждена Стандартная космологическая модель (так называемая ΛCDM-модель — от Λ-Cold Dark Matter) и существенно уточнены ее параметры. Это означает, что вплоть до поверхности последнего рассеяния теоретические представления современной космологии полностью подтверждаются наблюдательными данными. Напомним, что Стандартная космологическая модель — это пространственно-плоская модель нашей Вселенной, содержащая холодную (нерелятивистскую) темную материю и темную энергию. Параметры темной материи и темной энергии, согласно данным «ПЛАНК» составляют:  $\Omega_M = 26.8\%$ ,  $\Omega_\Lambda = 68.3\%$ . На долю обычного, барионного, видимого в телескопы вещества приходится

всего 4.9% от общей массы Вселенной (рис.5). Темная энергия представлена в модели в виде космологической постоянной, независящего от времени Λ-члена. Заметим сразу, что данные «ПЛАНК» все же допускают возможность непостоянства во времени параметра темной энергии, что может привести к интереснейшим прогнозам относительно будущего нашей Вселенной (например, к существованию так называемой фантомной темной энергии, плотность которой, в отличие от постоянной плотности Λ-члена, растет с расширением Вселенной; в этом случае за конечное время Вселенная достигнет бесконечных размеров — горизонта событий не будет, но расстояние между гравитационно несвязанными галактиками в далеком будущем станет бесконечно большим).

Во-вторых, не было обнаружено никаких существенных отклонений анизотропии от гауссового распределения, что говорит об отсутствии хоть сколько-нибудь значительных экзотических структур в нашей Вселенной.

Не было обнаружено стерильных нейтрино (очень слабо взаимодействующих частиц, предположительно участвующих в процессах нейтринных осцилляций и являющихся одними из канди-



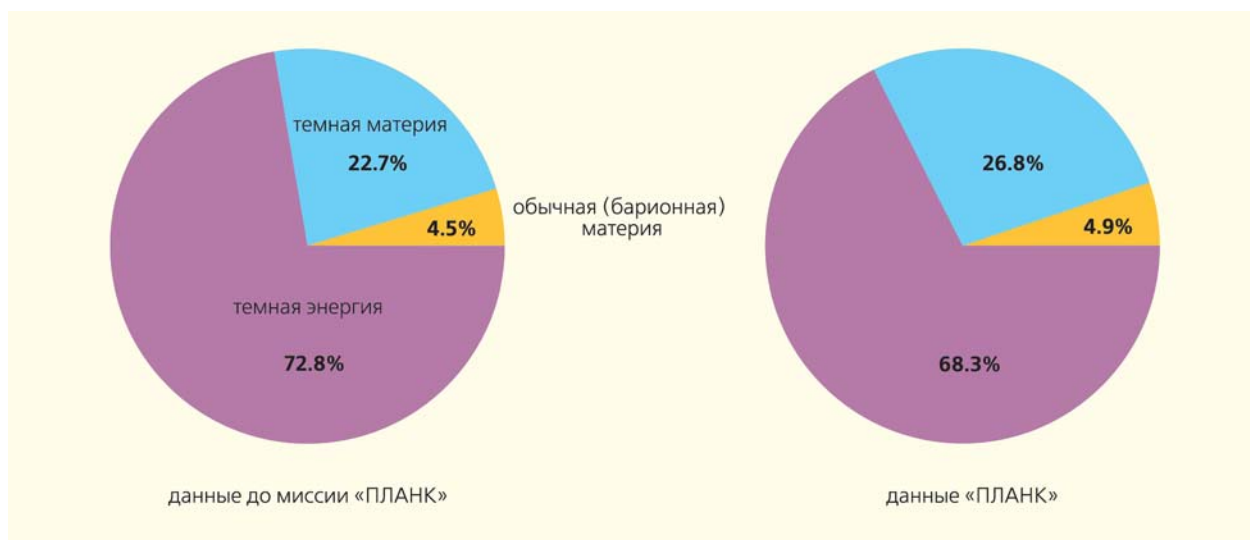


Рис.5. Сравнение основных космологических параметров, полученных в результате обработки данных девяти лет наблюдения аппарата «WMAP» (слева) и предварительной обработки данных аппарата «ПЛАНК».

датов в темную материю). Подтверждается модель о существовании только трех типов нейтрино.

Не было обнаружено космологических гравитационных волн. Об их наличии можно было бы судить в случае обнаружения так называемой В-моды поляризации реликтового излучения. Напомним, что Е- и В-моды (скалярная и псевдоскалярная части, или, иначе, четная и нечетная моды) есть способ представления тензора поляризации излучения. Эти моды, в отличие от известных характеристик излучения — параметров Стокса — инвариантны относительно преобразования координат. Кроме того, эти моды могут хорошо разделять типы возмущений (скалярные, векторные, тензорные). Так, скалярные возмущения генерируют только Е-моду, векторные — только В-моду, а тензорные — как Е-, так и В-моду. Гравитационные волны — это тензорные возмущения, а потому они должны с необходимостью содержать В-моду. Другим альтернативным источником этой моды могли бы быть космические струны. При предварительном анализе данных «ПЛАНК» В-моды обнаружено не было.

Удалось отсеять большой класс моделей инфляции (экспоненциального расширения) ранней Вселенной, ограничив с помощью наблюдений допустимые виды инфляционного потенциала. Однако в этом направлении предстоит еще много работы.

Было выявлено несогласование в определении параметра Хаббла по сверхновым типа Ia (кинематический параметр Хаббла) и по данным «ПЛАНК».

Исключены космологические модели с большими неоднородностями и пустотами («войдами»). По анализу эффекта Сюняева—Зельдовича составлен каталог кластеров и кандидатов в клас-

теры (в количестве около 1300). Составлен каталог компактных источников (звезд, пылевых облаков, звездных ядер, радиогалактик, блазаров, инфракрасных галактик, объектов межгалактического пространства). Измерена скорость и определено направление движения барицентра Солнечной системы относительно поверхности последнего рассеяния (369 км/сек). Установлено, что начальные возмущения были статистически однородны и гауссовы. Получено уточненное значение спектрального индекса. Обнаружен интегральный эффект Сакса—Вольфе, т.е. корреляция анизотропии реликтового излучения и гравитационных потенциалов, задающих крупномасштабную структуру Вселенной. Исследовано интегральное распределение масс вплоть до поверхности последнего рассеяния (гравитационное линзирование на крупномасштабных структурах). С большой точностью найдены космологические параметры: угловой размер звукового горизонта на эпоху рекомбинации, физическая плотность барионов и холодной темной материи, скалярный спектральный индекс, постоянная Хаббла, плотность вещества, число типов нейтрино, верхнее ограничение на сумму масс нейтрино всех типов.

### Существуют ли космические струны?

В заключение скажем несколько слов о космических струнах — предмете особенно тщательных поисков в последнее десятилетие. Интерпретация данных двух мощнейших аппаратов по исследованию анизотропии реликтового излучения, «WMAP» и «ПЛАНК», оставляет мало места для экзотических объектов. Однако они все-таки могут существовать, просто характеризующие их энергии не

должны быть слишком велики. В первую очередь речь идет о космических струнах. Согласно представлениям современной космологии, Вселенная расширялась и охлаждалась, проходя серию фазовых переходов, нарушающих симметрию. В разных точках пространства симметрия нарушалась по-разному, поэтому объединение таких разнородных участков в ходе расширения должно приводить к топологическим проблемам, в результате чего могут формироваться космические струны. Другими словами, последние представляют собой линейные области симметричного и высокоэнергетического вакуума, окруженного новыми областями, которые обладают уже меньшей симметрией и энергией (так называемая реликтовая темная энергия). Будучи топологически устойчивыми, они могут «дожить» до современных эпох. Данные «ПЛАНК» позволили получить ограничения на энергии таких объектов (было показано, что нет струн, энергии которых соответствуют энергиям теории Великого объединения,  $10^{16}$  ГэВ) — иначе говоря, сверхтяжелые струны обнаружены не были. Однако за основу моделирования космических струн брался тот факт, что эти объекты представляют собой сеть, равномерно распределенную по всей Вселенной, в то время как таких объектов может быть очень мало, а их энергии могут быть меньше.

Очень важной характеристикой ранней Вселенной стали данные по поляризации анизотропии реликтового излучения, однако в предварительных результатах «ПЛАНК» они полностью представлены не были.

Напомним, что фоновое реликтовое излучение не поляризовано. Однако его анизотропная часть обладает линейной поляризацией, которая возникает за счет комптоновского рассеяния анизотропного потока реликтовых фотонов на свободных электронах (линейна она потому, что дифференциальное сечение комптоновского рассеяния на покоящихся электронах зависит от поляризации начального и конечного фотонов).

Степень поляризации пропорциональна анизотропии реликтового излучения с коэффициентом, меньшим единицы. Так, амплитуда поляризации зависит от угловых масштабов соответствующих неоднородностей на карте анизотропии реликтового излучения и оказывается малой величиной, от одного до сотых долей микрокельвина.

Итак, теперь мы знаем, что космические струны — не основной источник анизотропии реликтового излучения. Однако они могут давать характерный спектр поляризации реликтового излучения — в частности, активно генерировать постинфляционную В-моду поляризации, что совместимо с моделями гибридной инфляции и с инфляцией на бране. Последнее означает моделирование инфляции в рамках современных многомерных теорий, согласно которым существует многомерное объемлющее пространство и в нем расположены гиперповерхности (браны), также могут обладать различными размерностями. Движения и взаимодействия бран теоретически и могут порождать космические струны — протяженные локализованные объекты, служащие непосредственными источниками возмущений. Сеть космических струн на протяжении своей эволюции активно возмущает фоновую метрику, равно генерируя скалярные, векторные и тензорные возмущения. Так, амплитуда векторных возмущений значима и сравнима со скалярными возмущениями, инфляционные же возмущения векторных мод не содержат. Тензорные возмущения могут генерировать как космические струны, так и космологические гравитационные волны, оценка их соответствующих вкладов представляется затруднительной. Кроме того, многие модели предсказывают преобладание скалярных мод над тензорными. Таким образом, струны являются хорошим альтернативным источником генерации В-моды. Шум «ПЛАНК» составляет около  $0.003 \text{ мК}^2$  (для сравнения: шум «WMAP»  $0.01 \text{ мК}^2$ ), что позволило бы выявлять как вклад космических струн, так и космологических гравитационных волн. ■

## Литература

1. *Вайнберг С.* Космология / Пер. с англ. К.Б.Алкалаева, В.Э.Подобеда, А.В.Беркова. М., 2013.
2. *Горбунов Д.С., Рубаков В.А.* Введение в теорию ранней Вселенной: В 2-х т. М., 2010.
3. *Сажин М.В.* Современная космология в популярном изложении. М., 2002.

# Взаимодействие климата и экосистем: исследования на стыке наук

А.В.Елисеев

**К**лиматическая система, наряду с ее физическими компонентами — атмосферой, океаном, деятельным слоем суши и криосферой — включает и экосистемы. Они взаимодействуют с каждым физическим компонентом и тем самым оказывают влияние на климатические характеристики в большом спектре пространственных и временных масштабов.

Традиционно взаимодействие климата и экосистем подразделяется на биогеохимическую и биогеофизическую составляющие. К первой из них относят процессы, связанные с поглощением химических веществ наземными и морскими системами и с последующими преобразованиями этих веществ внутри систем. Остальные процессы относят ко второй составляющей — биогеофизической.

Следует иметь в виду, что это разделение условно. Биогеофизические и биогеохимические процессы связаны между собой. Например, перенос влаги растениями из почвы в атмосферу и ассимиляция ими атмосферного углерода связаны на физиологическом уровне. Более того, при изменении типов экосистем в данном регионе изменяются характеристики и биогеофизических, и биогеохимических процессов.

© Елисеев А.В., 2013



*Алексей Викторович Елисеев, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории теории климата Института физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН. Область научных интересов — физико-математическое моделирование взаимодействия климата и экосистем.*

В статье предлагается краткий обзор сведений, касающихся взаимодействия климата и экосистем. Некоторые данные проиллюстрированы результатами расчетов с помощью глобальной климатической модели, разработанной в нашем институте. В этой современной модели использован ряд упрощений по сравнению с моделями общей циркуляции (что позволяет в сотни раз увеличить скорость расчетов, но за счет «огрубления» системы). Поэтому наша модель относится к классу климатических моделей промежуточной сложности [1].

## Биогеофизические процессы

**Тип растительности и альbedo.** Солнце — основной источник энергии для погодных и климатических процессов. Поэтому важную роль играет доля солнечной энергии, усваиваемая климатической системой. Эту долю обычно описывают с использованием понятия альbedo — коэффициента отражения солнечного излучения от поверхности. Естественно, что альbedo суши зависит от типа растительности и характеристик почвы. Самое высокое альbedo у чистого снега — 0.7—0.9 (т.е. лишь 10—30% солнечной энергии поглощается земной поверхностью, а остальное отражается). Альbedo песка 0.3—0.4, травы — 0.20—0.25, лесов — 0.05—0.25, вспаханных почв — от 0.05—0.15 (черноземов) до 0.2—0.3 (подзолов), а альbedo океана, как правило, не превышает 0.1.



Очевидно, что смена одного типа экосистемы другим приводит к изменению альbedo поверхности, а следовательно, и доли солнечной энергии, поглощаемой климатической системой.

В этом и следующем разделах для определенности речь пойдет лишь об одном (наиболее распространенном) типе изменений экосистем — смене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями. Часто при этом вырубленные леса заменяются травянистой растительностью, например зерновыми культурами (происходит так называемая дефорестация). Как правило, расширение сельскохозяйственных угодий увеличивает альbedo поверхности (место более темных видов растений занимают более светлые), что приводит к снижению поглощения солнечной энергии климатической системой.

Это наиболее очевидный, но не единственный механизм влияния растительности на альbedo. Еще один — зимний — связан с так называемой «маскировкой» снега древесной растительностью. Снег покрывает почву и траву, резко меняя альbedo поверхности. Но, выпадая в лесу, он «проваливается» сквозь ветви и накапливается на подстилке. Как следствие, изменение альbedo поверхности (точнее, системы поверхность—растительность) при выпадении снега в лесах оказывается меньше, чем в степях, полупустынях и пустынях. Например, увеличение альbedo для травяных экосистем от зимы к лету составляет 50—55%, тогда как для лесов — не более 10%. Если при развитии сельского хозяйства в регионах, где зимой выпадает снег, происходит замена лесов на травянистую растительность, то «маскировка» снега исчезает, что дополнительно увеличивает альbedo.

Численные эксперименты с климатическими моделями позволили оценить влияние землепользования на изменение климата в последние столетия. Было подсчитано, что увеличение альbedo поверхности относительно доантропогенного состояния привело к охлаждению климата на 0.11—0.25°C [2, 3]. Примерно две трети причин такого охлаждения обусловлено дефорестацией в XX в. [3]. Тут следует отметить, что увеличение глобальной температуры атмосферы у поверхности составило 0.6±0.2°C [1]. Следовательно, 10—20% возможного глобального потепления могло быть скомпенсировано дефорестацией.

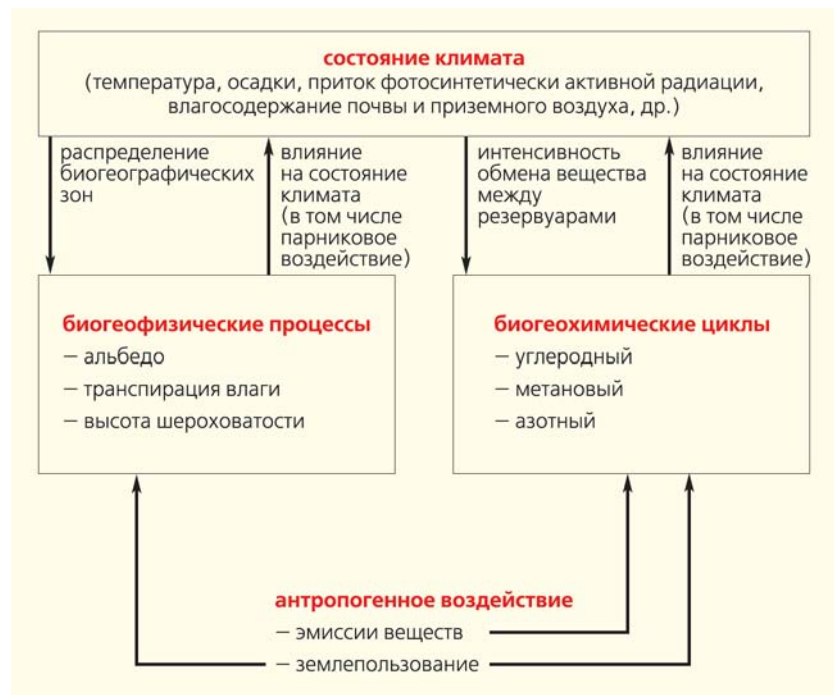
**Транспирация. Дождь следует за плугом?**

Фраза, вынесенная во вторую часть подзаголов-

ка, — это перевод на русский язык американской поговорки «rain follows the plow». Протестанты, составившие большинство белых колонистов Североамериканского континента, верили, что бог помогает усердным труженикам, посылая дождь на вспаханные поля. Это нашло отражение в созданной в середине XIX в. теории, согласно которой сельскохозяйственная обработка полупустынных регионов приводит к увеличению осадков в них. Однако в реальности все не так просто.

Растения поглощают влагу из почвы и выделяют в атмосферу. Этот весьма важный процесс называется транспирацией. Именно благодаря ей с поверхности суши в атмосферу попадает от 80 до 90% влаги (это эквивалентно 62±8 тыс. км³ жидкой воды ежегодно), на долю же остальных процессов переноса влаги в атмосферу (испарения с поверхности водоемов, из пор почвы и т.д.) приходится лишь 10—20%. Как и альbedo поверхности, интенсивность транспирации зависит от типа растительности. Например, коэффициент использования влаги (отношение интенсивности фотосинтеза к интенсивности транспирации) лесными растениями составляет 2.4—6.7 гC/kgH₂O, травой — 2.1—4.4 гC/kgH₂O, сельскохозяйственными культурами — 1.6—4.0 гC/kgH₂O.

При замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями меняется интенсивность транспирации. Это приводит к изменению притока влаги в атмосферу и, как следствие, может повлиять на режим осадков. Более того, эффект может усиливаться изменениями температуры, связанными с изменением альbedo поверхности



Взаимодействие климата и экосистем.

(см. предыдущий раздел). Увеличение температуры приводит к росту содержания водяного пара в атмосфере (в соответствии с уравнением Клаузиуса—Клапейрона). Здесь уместно отметить, что водяной пар — самый сильный парниковый газ, поглощающий тепловое излучение поверхности Земли (атмосфера при этом нагревается). Он также способен рассеивать солнечную радиацию.

Значения коэффициента использования влаги разными растениями показывают, что при дефорестации (с учетом близких значений интенсивности фотосинтеза разных типов растений [4]) интенсивность транспирации должна уменьшаться, снижая при этом влагосодержание атмосферы, а следовательно, и количество осадков весной и летом. Этот вывод был получен путем подсчетов с использованием нашей климатической модели [2], в том числе для основных регионов сельскохозяйственного производства на юге европейской части России. Значит, при дефорестации «дождь не следует за плугом». Уменьшение осадков в таких регионах было выявлено и по фактическим наблюдениям [1]. По-видимому, это следствие изменения как глобальной циркуляции атмосферы, так и землепользования в данном регионе.

Однако при интенсификации земледелия повышение продуктивности угодий ведет к более интенсивной транспирации влаги экосистемой.

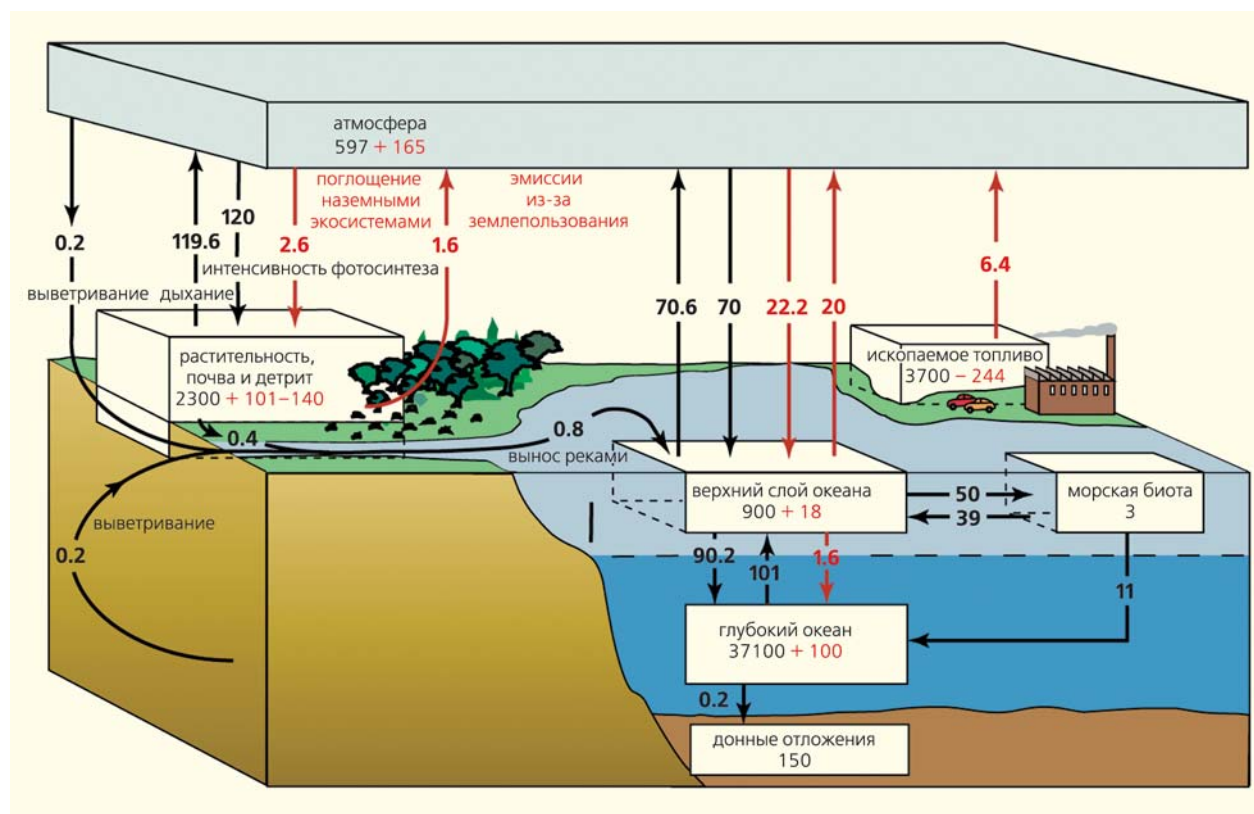
В этом случае «следование дождя за плугом» возможно. В частности, увеличение количества осадков было отмечено в регионах Великих Равнин США, и связано оно было с ростом продуктивности сельского хозяйства в этом регионе [5].

Есть и еще один механизм влияния растительности на гидрологический цикл. Это перехват дождевой влаги листьями деревьев. Далеко не вся влага, попавшая на листья, достигает почвы. Ее значительная часть испаряется. Например, тропические леса перехватывают 13% выпадающих осадков, а леса умеренного пояса и тайга — 19–22%.

### Биогеохимические процессы

**Углеродный цикл.** Как уже отмечалось, биогеохимические процессы представляют собой совокупность явлений, связанных с поглощением, преобразованием и последующим выделением вещества экосистемами. Особую роль играет углеродный цикл, связанный с двумя углеродсодержащими соединениями — углекислым газом ( $\text{CO}_2$ ) и метаном ( $\text{CH}_4$ ). Оба эти вещества — парниковые газы.

Содержание  $\text{CO}_2$  (как и других примесей) в атмосфере определяется не только антропогенной эмиссией, но и обменом с естественными систе-



Глобальный углеродный цикл [1]. Резервуары выражены в ГтС, потоки — в ГтС/год. Черным цветом указаны доиндустриальные значения, красным — их изменения к концу XX в.

мами. В частности, для углекислого газа очень важен обмен с экосистемами океана и суши.

Перед началом индустриального периода концентрация углекислого газа в атмосфере была близка к  $280 \text{ млн}^{-1}$  (т.е. из миллиона молекул воздуха в среднем 280 были молекулами  $\text{CO}_2$ ), что соответствует примерно 600 ГтС (гигатонн углерода). За индустриальный период концентрация увеличилась почти в полтора раза и к 2012 г. достигла  $394 \text{ млн}^{-1}$ . Соответствующее увеличение массы углерода в атмосфере составило около 240 ГтС, что оказалось значительно меньше оценок эмиссии  $\text{CO}_2$  за счет сжигания ископаемого топлива ( $\approx 360$  ГтС) и землепользования ( $\approx 180$  ГтС), составивших в сумме примерно 540 ГтС. Это связано с тем, что более половины  $\text{CO}_2$ , выделенного за счет антропогенной деятельности, было поглощено океаном и наземными экосистемами.

В настоящее время основным источником увеличения массы  $\text{CO}_2$  в атмосфере — антропогенные эмиссии от сжигания топлива ( $\approx 10$  ГтС/год в конце первого десятилетия XXI в.). Меньший вклад вносит сжигание биомассы при дефорестации (порядка 1 ГтС/год), хотя вплоть до начала XX в. этот источник доминировал. Такие процессы, как выветривание почв и вулканизм, дают пренебрежимо малый вклад в баланс углерода в атмосфере ( $\approx 0.2$  ГтС/год и  $\approx 0.1$  ГтС/год соответственно).

Морская часть углеродного цикла связана с растворением  $\text{CO}_2$  в воде и функционированием морских экосистем. Океан — один из самых больших резервуаров углерода на Земле ( $\approx 39$  тыс. ГтС). Однако большая часть этой массы находится в среднем и глубоком слоях океана с временем отклика порядка нескольких столетий или тысячелетий. Как следствие, в масштабах до нескольких столетий доступны лишь около 2 тыс. Гт океанического углерода.

Поглощение  $\text{CO}_2$  морской водой происходит в регионах, где парциальное давление углекислого газа, растворенного в воде, оказывается меньше, чем в атмосфере. Это случается, когда в данном регионе доминирует перенос морской воды от поверхности океана вглубь — например, в средних широтах Северного и Южного полушарий, а также в Атлантическом океане к югу от Гренландии. Суммарное поглощение углекислого газа океаном из атмосферы в этих районах составляет, по разным оценкам, 60–90 ГтС/год [6, 7]. Однако оно почти полностью компенсируется выделением  $\text{CO}_2$  в регионах, где восходящие течения выносят из глубины на поверхность богатую углекислым газом морскую воду, так что здесь парциальное давление углекислого газа, растворенного в воде, оказывается больше его парциального давления в атмосфере. Это происходит в тропиках, в Южном и на северо-западе Тихого океана. Как следствие, суммарное поглощение  $\text{CO}_2$  из атмосферы океаном (так называемый нетто-поток) оказывается значительно меньше ука-

занных значений и для конца XX — начала XXI в. составляет 2.0–2.5 ГтС/год [1]. Этот показатель может изменяться при накоплении углекислого газа в атмосфере, а также при климатических изменениях разной природы. Например, в соответствии с законом Генри, растворимость  $\text{CO}_2$  в морской воде уменьшается при увеличении температуры, что при прочих равных условиях снижает интенсивность поглощения углекислого газа океаном.

Первичная продукция морских экосистем оценивается примерно в 50 ГтС/год [1]. Запас углерода в них близок к 1 Гт. Однако этот углерод сосредоточен в основном в морском планктоне с малым временем жизни (порядка недели). Как следствие, на годовых и больших временных масштабах поток углерода в океане оказывается хорошо сбалансированным за счет выделения углерода в морскую воду и экспорта вещества (скелетов и раковин) на дно при отмирании организмов. Однако нельзя исключить, что при значительном изменении климата баланс этого потока нарушится и он начнет вносить заметный вклад в нетто-поток  $\text{CO}_2$  между океаном и атмосферой.

Донные отложения (формирующиеся при накоплении скелетов и раковин) способны растворяться в морской воде. Это медленный процесс, дающий заметный вклад в изменение массы углерода в океане лишь в масштабах тысячелетий. Его интенсивность, однако, зависит от степени закисленности океана, которая, в свою очередь, увеличивается при накоплении  $\text{CO}_2$ . Этот процесс, с одной стороны, уменьшает его парциальное давление в океане (из-за сдвига химического равновесия карбонатной системы в сторону меньшей концентрации  $\text{CO}_2$ ) и, следовательно, увеличивает его способность поглощать углекислый газ из атмосферы. С другой стороны, закисление океана весьма опасно для моллюсков и кораллов, так как приводит к растворению их раковин и скелетов и, следовательно, к их гибели.

Наземная часть углеродного цикла определяется прежде всего фотосинтезом с суммарной интенсивностью  $123 \pm 8$  ГтС/год. Как и в океане, поток углерода сбалансирован дыханием растений ( $\approx 60$  ГтС/год) и разложением углерода, поступившего в почву с опадом листьев и веток и при их отмирании (также около 60 ГтС/год) [1]. Большой вклад вносят природные (верховые и торфяные) пожары. Они приводят к эмиссиям  $\text{CO}_2$  в атмосферу в количестве около 1.4 ГтС/год. Большая степень взаимной компенсации этих потоков ведет к тому, что нетто-поток углерода из атмосферы в наземные экосистемы (без учета эмиссий  $\text{CO}_2$  в атмосферу при дефорестации) в последнее десятилетие XX в. в среднем составляет до 4.3 Гт/год [1].

Запас углерода в наземной растительности оценивается величиной 450–650 Гт [1]. На его изменение влияют три фактора. Первый — климат, опре-



деляющий условия жизни растений в данном регионе. Второй фактор — так называемый эффект фертилизации (повышения урожайности) растительности за счет  $\text{CO}_2$  атмосферы [6]. Третий фактор — дефорестация при землепользовании. Запас углерода почвы, по разным оценкам, составляет от 1.5 до 2.5 тыс. Гт. Эти оценки сделаны без учета многолетнемерзлых грунтов (вечной мерзлоты), образовавшихся в теплые эпохи прошлого — предыдущие межледниковья. Количество углерода в вечной мерзлоте может достигать 1—2 тыс. Гт [8]. При потеплении климата и связанном с ним таянии многолетнемерзлых грунтов этот углерод может быть включен в активный цикл. Таким образом, потоки углерода между атмосферой и наземными экосистемами (так же, как и океаном) могут меняться при накоплении углекислого газа в атмосфере или при климатических изменениях. Кроме того, фотосинтез растений может подавляться загрязнением атмосферы рядом примесей — например, озоном или соединениями серы [6].

В последнее десятилетие в разные климатические модели активно внедряются интерактивные блоки углеродного цикла. В настоящее время разработано более десятка таких моделей и проведено сравнение между ними [9]. Следует отметить, что среди климатических моделей с углеродным циклом есть и две российские: глобальные модели, созданные в нашем институте [10, 11] и в Институте вычислительной математики РАН [12]. Основным результатом численных экспериментов с такими моделями стало выявление положительной обратной связи между климатом и углеродным циклом. Установлено, что климатические изменения, сопровождающие рост содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, влияют на морскую и наземную составляющие углеродного цикла. В результате поглощение обоими резервуарами углекислого газа из атмосферы в целом уменьшается (хотя возможны и значительные региональные особенности). В частности, в XXI в. взаимодействие климата и углеродного цикла усиливает потепление, как следует из моделей, примерно на 10% [10].

**Метановый цикл** — важная часть взаимодействия климата и экосистем. Так как молекула метана содержит атом углерода, то из соображений закона сохранения массы метановый цикл, строго говоря, должен рассматриваться как часть углеродного. Более того, один из продуктов окисления метана — именно углекислый газ. Однако некоторые особенности геохимических преобразований приводят к выделению отдельного цикла, связанного с углеродным. Следует отметить, что  $\text{CH}_4$  — сильный парниковый газ. Более того, в пересчете на одну молекулу сечение поглощения теплового излучения для метана оказывается в 20—25 раз больше, чем для углекислого газа.

Подобно содержанию  $\text{CO}_2$ , концентрация метана в атмосфере за индустриальный период значи-

тельно выросла: от примерно 700 млрд<sup>-1</sup> в его начале до 1700—1750 млрд<sup>-1</sup> в первом десятилетии XXI в. Это соответствует увеличению массы  $\text{CH}_4$  в атмосфере на 2.8 Гт (общепринято, что массу  $\text{CO}_2$  в атмосфере выражают в единицах элементарного углерода, а метана — в единицах полной массы).

Известны два механизма образования метана естественным путем. Первый из них обусловлен деятельностью бактерий-метаногенов в анаэробных условиях (т.е. при отсутствии кислорода). Второй связан с выделением метана в результате высокотемпературных реакций в земной коре.

Основная причина роста содержания метана в атмосфере — его антропогенные эмиссии, увеличившиеся с 0.03 Гт/год в начале XIX в. до 0.3 Гт/год в первые годы XXI в. Около 80% этого потока обусловлены сельскохозяйственной деятельностью (возделыванием риса, разложением органических остатков, ферментацией в кишечниках крупного рогатого скота, сжиганием биомассы), а остальные 20% — утечками из трубопроводов [1]. Естественные потоки  $\text{CH}_4$  на 75—80% определяются его образованием в почвах влажных экосистем (здесь огромную роль играют болота), в меньшей степени — другими процессами: жизнедеятельностью термитов, выделением из водоемов, разложением органических остатков в естественных условиях, поступлением из земной коры. Суммарная интенсивность источников метана оценивается в 0.5—0.6 Гт/год [1]. Эта величина намного больше скорости накопления метана в атмосфере в XX — начале XXI в., которая составляет 0.03 Гт/год. Значит, суммарная интенсивность источников должна быть близка к интенсивности стоков. А важнейший из них — это разрушение  $\text{CH}_4$  при реакции с гидроксил-радикалом  $\text{OH}^-$  [8]. За счет этой реакции разрушается 75—85% атмосферного метана и образуется углекислый газ. Ее высокая интенсивность приводит к тому, что среднее время нахождения метана в земной атмосфере (определяемое как отношение массы  $\text{CH}_4$  к интенсивности его разрушения) равно  $8.7 \pm 1.3$  года [1]. Дополнительно небольшое количество метана разрушается в стратосфере благодаря взаимодействию с хлором и атомарным кислородом. Около 5% окисляется в порах почвы, насыщенными влагой.

Интенсивность ряда источников метана увеличивается с ростом температуры. Это справедливо, например, в отношении рисовых полей, влажных экосистем (включая болота) и разложения органики [8]. Как следствие, дополнительное выделение метана при потеплении климата может увеличить парниковое воздействие и привести к еще большему потеплению. Это особенно важно в связи с тем, что большинство влажных экосистем (бореальные болота, тундра) находятся в субполярных широтах, где в междекадных масштабах времени потепление климата оказывается наиболее значимым. Однако расчеты по двум россий-

ским климатическим моделям показали, что, несмотря на значительное увеличение содержания метана в атмосфере из-за потепления, климатический отклик на антропогенные эмиссии окажется очень малым [13, 14].

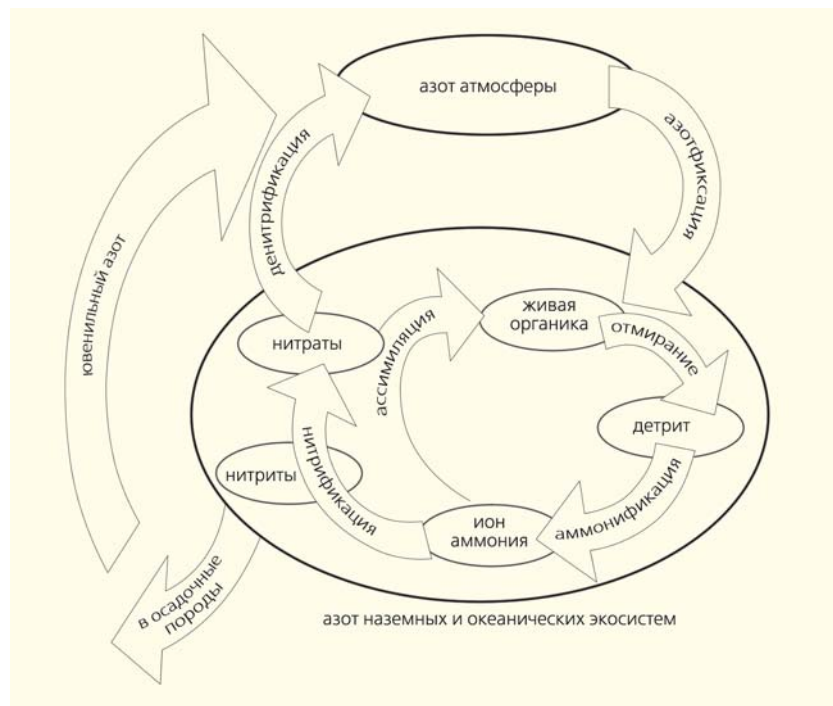
Еще один потенциально важный источник метана — газогидраты. Они формируются, когда из-за наличия определенных примесей структура кристаллической решетки льда меняется с кубической на гексагональную. И одна из таких примесей — метан. Газогидраты могут существовать в условиях либо высокого давления (как правило,  $\geq 120$  атм — это возможно, например, в океанических регионах из-за массы воды), либо очень холодного климата (в частности, на суше в зоне распространения вечной мерзлоты). А разрушаться (с выделением  $\text{CH}_4$ ) они станут при потеплении или при понижении уровня океана. Общий запас метана в газогидратах оценивается в 0.5–2.5 тыс. Гт [8], т.е. его выделение в принципе способно создать значительный парниковый эффект и привести к резкому потеплению климата — как это, вероятно, произошло 55 млн лет назад [15].

В ледниковые периоды (в том числе в последних, с началом около 100 тыс. лет назад, максимумом  $\approx 21$  тыс. лет назад и возвращением к климату межледниковья примерно 8 тыс. лет назад) накопление воды в ледовых щитах приводило к понижению уровня океана (в период последнего оледенения — примерно на 120 м). Это должно было способствовать диссоциации газогидратов океанического дна. Однако обнажение шельфа сопровождалось его охлаждением на несколько десятков градусов, что, как считается, наоборот, приводило к формированию гидратов метана [16]. В XXI в., в отличие от эмиссий  $\text{CH}_4$  из влажной почвы, прогрев океанического дна будет продолжаться очень медленно даже при наиболее агрессивных возможных сценариях антропогенного воздействия на климатическую систему. Как следствие, резкого усиления парникового эффекта из-за разложения газогидратов ожидать не следует [17].

**Азотный и фосфорный циклы.** Углеродный цикл — не единственный включенный в биогеохимическое взаимодействие. Важную роль играют также циклы азота и фосфора — веществ, необходимых живым организмам для нормального функционирования. В настоящее время делаются первые попытки включать азотный и фосфорный циклы в глобальные климатические модели.

Несмотря на то, что около 78% объема атмосферы составляет азот, для многих процессов в экосистемах он становится лимитирующим фактором. Это связано с доминированием в земной атмосфере молекулярного азота — химически устойчивого соединения, которое не усваивается фотосинтезирующими растениями и большинством микроорганизмов. Недостаток минеральных форм почвенного азота негативно сказывается на развитии растительного покрова, приводя к его угнетению, и тем самым сдерживает поглощение углерода наземными экосистемами [18, 19]. Запасы азота в них состоят из азота в растительности (10–16 Гт), в биомассе животных ( $\approx 0.2$  Гт), а также минерального (доступного растениям; 16–140 Гт) и органического (поглощение которого растениями возможно лишь после перехода в минеральную форму) азота почвы (70–820 Гт) [19]. В целом лимитирование фотосинтеза азотом оказывается важным вне тропиков. В тропиках и в средних широтах продуктивность растений может быть ограничена доступностью фосфора.

В океанических фотосинтезирующих экосистемах содержание азота и фосфора можно оценить по классическому соотношению Редфилда ( $\text{C:N:P} = 106:16:1$ , т.е. каждым 106 атомам углерода отвечают 16 атомов азота и один — фосфора), которое выполняется с точностью не менее 20%. Это соответствует  $\approx 0.2$  Гт азота [19] и  $\approx 0.02$  Гт фосфора. Недостаток этих элементов способен подавить продуктивность не только наземных, но и морских экосистем. Кроме того,  $\approx 0.2$  Гт азота содержится



Глобальный азотный цикл [19].

в биомассе морских животных, 45–900 Гт — в океаническом детрите, 100–700 Гт — в растворенных неорганических соединениях. Наибольший по массе (10–22 тыс. ГтN), но не участвующий в активном азотном цикле, — резервуар растворенного в океане молекулярного азота N<sub>2</sub> [19].

\* \* \*

Климатические изменения, наблюдавшиеся на протяжении истории Земли и ожидаемые в будущем, способны существенно изменять состояние наземных и океанических экосистем. А взаимодействие экосистем и климата, в свою очередь, само может привести к климатическим изменениям.

Для России, более половины площади которой покрыто лесами, прежде всего сибирской тайгой, влияние такого взаимодействия на состояние климатической системы представляется особенно важным. В частности, российские леса в настоящее время служат значительным стоком антропогенного углерода из атмосферы, способствуя тем самым стабилизации климата [18].

Взаимодействие климата и экосистем в настоящее время — одно из наиболее быстро развивающихся направлений науки о климате. Можно ожидать, что ряд важных результатов, полученных в последние примерно полтора десятилетия, будут значительно расширены и уточнены уже в ближайшие годы. ■

## Литература

1. Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Eds S.Solomon, D.Qin, M.Manning et al. Cambridge; N.Y., 2007. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html)
2. Brovkin V., Claussen M., Driesschaert E. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity // *Climate Dynamics*. 2006. V.26. №6. P.587–600.
3. Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние учета радиационного эффекта изменения альbedo поверхности суши при землепользовании на воспроизведение климата XVI—XXI веков // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т.47. №1. С.18–34.
4. Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. М., 2005.
5. Groisman P.Y., Knight R.W., Karl T.R. Changes in intense precipitation over the central United States // *Journal of Hydrometeorology*. 2012. V.13. №1. P.47–66.
6. Семенов С.М., Кунина И.М., Кухта Б.А. Сравнение антропогенных изменений приземных концентраций O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> в Европе по экологическому критерию // *Докл. Академии наук*. 1998. Т.361. №2. С.275–279.
7. Бялко А.В. Вариации концентрации радиоуглерода и газообмен атмосфера—океан // *Докл. Академии наук*. 2013. Т.451. №1. С.28–32.
8. O'Connor F.M., Boucher O., Gedney N. et al. Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: A review // *Reviews of Geophysics*. 2010. V.48. №4. RG4005.
9. Friedlingstein P., Cox P., Betts R. et al. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison // *Journal of Climate*. 2006. V.19. №22. P.3337–3353.
10. Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А. Взаимодействие климата и углеродного цикла в XX—XXI веках в модели климата промежуточной степени сложности // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т.43. №1. С.3–17.
11. Eliseev A.V., Mokhov I.I. Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2011. V.28. №5. P.1215–1232.
12. Володин Е.М. Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т.43. №3. С.298–313.
13. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др. Учет взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т.44. №2. С.147–162.
14. Володин Е.М. Цикл метана в модели климата ИВМ РАН // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т.44. №2. С.163–170.
15. Голицын Г.С., Гинзбург А.С. Оценки возможности «быстрого» метанового потепления 55 млн лет назад // *Докл. Академии наук*. 2007. Т.413. №6. С.816–819.
16. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // *Докл. Академии наук*. 2012. Т.446. №3. С.330–335.
17. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Оценка отклика субаквальных залежей метангидратов на возможные изменения климата в XXI веке // *Докл. Академии наук*. 2011. Т.441. №5. С.685–688.
18. Arnett A., Harrison S.P., Zaeble S. et al. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system // *Nature Geoscience*. 2010. V.3. №8. P.525–532.
19. Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Елисеев А.В. Цикл азота в земной климатической системе и его моделирование // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т.49. №3. С.255–270.



# Спектры возмущений климатической системы

А.В.Бялко

Спектральный анализ — надежное, самый продуктивный инструмент экспериментальной физики. Спектры электромагнитного излучения раскрывают строение вещества от элементарных частиц до Вселенной. Спектр собственных колебаний Земли, генерируемых крупными землетрясениями, дает информацию о ее внутреннем строении. Список можно продолжать.

В этой статье речь пойдет о спектральных характеристиках современного климата. Мы не будем касаться его потепления, а расскажем о глобальных колебаниях с характерными периодами от двух до десятка лет. Не так просто понять, следует ли отнести эти колебания (их называют межгодовыми или квазидвухлетними) к погодным явлениям или климатическим. С одной стороны, климатические параметры вычисляются усреднением по периодам, намного превышающим два-три года, поэтому с точки зрения метеорологов квазидвухлетние колебания температуры и осадков — явно вариации погоды. С другой стороны, эти колебания глобальны: одновременно по всей планете от экватора до полюсов становится то теплее, то холоднее. Речь идет всего лишь о десятых долях градуса, что могло бы показаться незначительным, если бы не загадочная синхронность этих колебаний. Очевид-



*Алексей Владимирович Бялко, доктор физико-математических наук, ассоциированный сотрудник Института теоретической физики им.Л.Д.Ландау РАН, первый заместитель главного редактора журнала «Природа». Область научных интересов — теоретическая физика, науки о Земле.*

но, что объяснение глобального явления нужно искать, выясняя особенности всей системы земного климата. Покажем, как по многолетним рядам наблюдений вычисляются спектры возмущений климатической системы. Их сравнение между собой не приведет к полной ясности, но поможет избавиться от произвольных гипотез.

## Эль-Ниньо — южные осцилляции

Наиболее ярко межгодовые колебания проявляются в Тихом океане, они отмечались примерно с середины XIX в. как нерегулярное чередование теплых и холодных прибрежных течений (Эль-Ниньо и Ла-Ниньо). Теплая фаза колебания начинается прогревом тропических широт Тихого океана с одновременным возникновением градиента давления. Через несколько лет отклонения происходят с обратным знаком. С некоторой задержкой тихоокеанские возмущения сказываются на всей климатической системе, влияя как на погоду Атлантики, так и на муссоны Индии. Кроме тихоокеанских колебаний, в основном широтной направленности, существуют также колебания температур в меридиональном направлении между севером и югом Атлантического океана, с примерно тем же временным масштабом, но меньшей амплитуды.

Поскольку межгодовые колебания в Тихом океане предшествуют погодным отклонениям в остальных регионах планеты, их можно использовать для вероятностного прогноза погоды в полугодовом диапазоне. Поэтому для их описания был создан указатель ЭНСО (ENSO, El Nin'о—South Oscillation) [1]. Этот индекс представляет собой ряд чисел, которые формируются из отклонений от кли-

© Бялко А.В., 2013

матических средних значений температуры поверхности Тихого океана и широтного перепада давлений. Индекс нормирован так, чтобы за период наблюдений его средняя величина была нулевой, а дисперсия равнялась единице. Положительные значения отвечают фазе Эль-Ниньо. Поскольку отсчет исходных данных проводится от климатически средних значений, годичные и полугодовые моды в индексе ЭНСО отсутствуют.

Опубликованы две последовательности индекса ЭНСО: историческая и современная. Последняя рассчитана с 1950 г. и обновляется ежемесячно с небольшой коррекцией предыдущих месяцев. Ряд исторического индекса рассчитан по менее полным измерениям, он охватывает период с 1871 г. по 2005 г. В общем временном промежутке конкретные величины этих индексов немного различаются, что связано с их нормировкой по разным базам данных.

Чем именно вызваны межгодовые колебания, строго говоря, неизвестно. Возможно, они представляют собой так называемые автоколебания климатической системы, независимые от внешних причин. Однако есть также мнение, что эти осцилляции возбуждаются под действием возмущений вращения Земли, вызванных сложным движением Луны. Аргументы Н.С.Сидоренкова, кото-

рый отстаивает эту гипотезу, были кратко изложены в моей статье [2], где рассмотрен спектр длительности земных суток. Сравнение характерных частот земного вращения с климатическими даст возможность принять или отвергнуть связь земной погоды с лунными вариациями.

Рассчитаем спектры\* межгодовых колебаний по нескольким рядам климатических данных. Оба ряда индекса ЭНСО пригодны для этой цели без предварительной обработки. Публикуются также две последовательности среднемесячных глобальных температур земной поверхности [3, 4]. Они получены на базе повсеместных метеорологических измерений. Метод вычисления следующий. Поверхность планеты разбивается на площадки размером  $5^\circ \times 5^\circ$ . Из среднемесячных температур каждого такого района вычитается климатическое значение для этой местности в текущем месяце. Затем вычисляется средняя величина полученных отклонений по всем пятиградусным квадратам. Сложность описанной процедуры приводит к тому, что конкретные результаты двух рядов немного различаются. Их среднегодовые кривые подобны, но имеют сис-

\* Метод расчета спектральных характеристик был подробно описан в предыдущей статье [2].

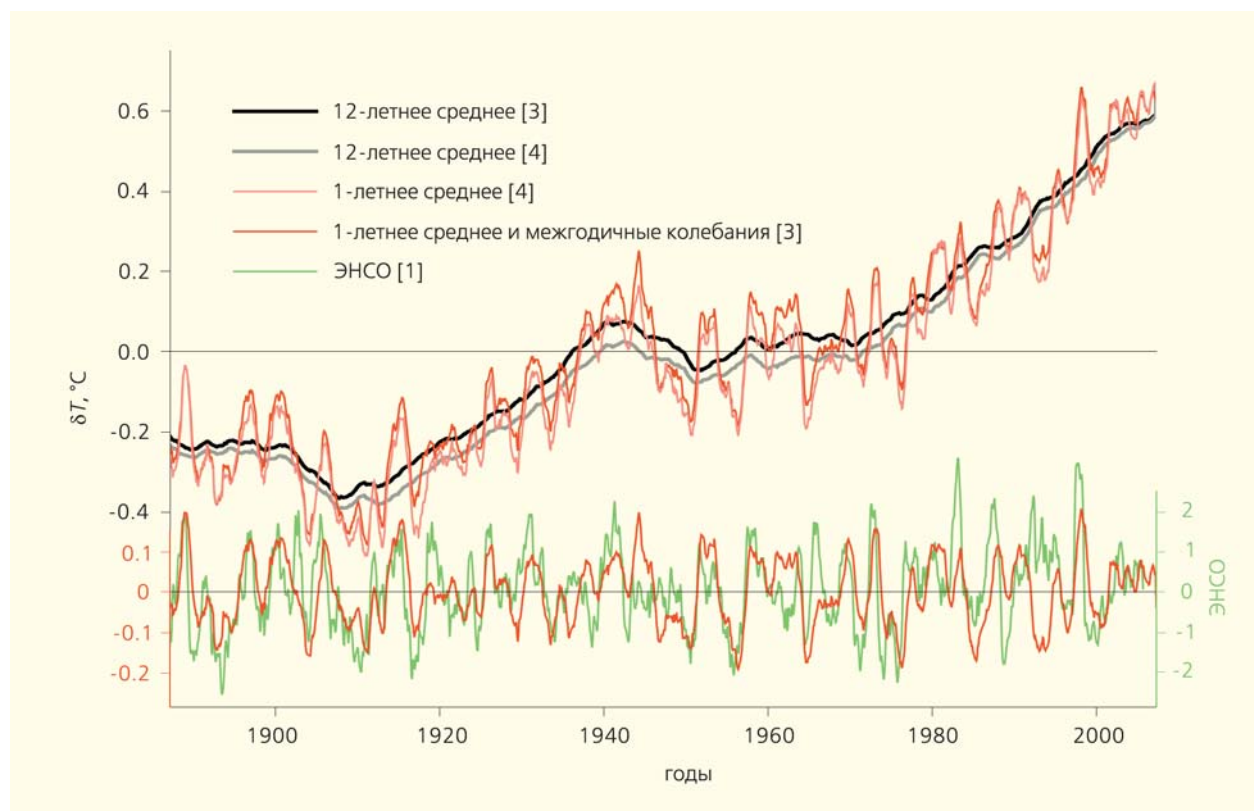


Рис.1. Вариации глобальных климатических переменных. Изменения температуры земной поверхности по двум источникам [3, 4], их среднегодовые и 12-летние средние. Внизу приведены исторические вариации указателя Эль-Ниньо—Южные осцилляции (ЭНСО) [1] и разность между годичным и 12-летним средним глобальной температуры.

тематическую разницу, меняющуюся от  $0.01^\circ$  до  $0.04^\circ$  (рис.1).

Непосредственному вычислению корреляторов и спектров межгодовых колебаний по этим данным мешает присутствующий в них тренд: с 1910 г. температура возросла почти на  $1^\circ$ . Поэтому поступим следующим образом: вычтем из среднегодовых температур скользящее среднее с «окном» в  $T_w = 12$  лет. Необходимо пояснить естественный вопрос, почему именно такой период был выбран для вычисления трендовой температурной кривой. Ряды длиной в 120 лет позволяют взять для вычисления тренда и больший период  $T_w$ , скажем 20 или даже 30 лет. Но мы собираемся найти спектры и более коротких 60-летних рядов данных (их достоверность несколько выше), а методу отделения колебательных составляющих от тренда желательно сохранить, поскольку при этом можно будет получить надежную оценку точности корреляционной функции. Кроме того, при усреднении концы ряда длиной  $0.5T_w$  пропадают (или опять-таки требуют иного метода усреднения), что ограничивает точность расчетов. Выбор более короткого окна усреднения, например 6-летнего, в принципе также не исключен, но тогда исчезла бы возможность проверить, присутствует ли в спектре колебаний 11-летняя мода солнечной активности.

Один из полученных таким образом рядов колебаний глобальной температуры приведен на рис.1 вместе с историческим индексом ЭНСО. На глаз можно заметить, что межгодовые колебания ЭНСО немного опережают температурные вариации, но ответить на вопрос, как велико это опережение и существенна ли взаимосвязь двух зависимостей, можно, только вычислив ковариации этих рядов.

Функции автокорреляции индекса ЭНСО и двух температурных рядов оказались не совпадающими, но похожими. Подобие этих корреляторов не вызывает особого удивления, поскольку исторические данные по температуре всех трех зависимостей от времени, по-видимому, опираются на одни и те же первичные источники. Намного более содержательным окажется их сравнение с независимыми данными — измерениями концентрации атмосферного диоксида углерода, которые также имеют климатический характер.

## Концентрация $\text{CO}_2$ : разделяем тренд и колебания

Из имеющихся измерений концентрации  $\text{CO}_2$  будем исследовать наиболее длинный ряд данных, полученный на Мауна Лоа, острове Гавайского архипелага. Ежемесячные средние концентрации  $\text{CO}_2$  в частях на миллион (ppm) публикуются с 1958 г., еженедельные — с 1973 г. [5]. Кроме того, существуют ежемесячные данные по концентрации, средней по планете — они известны с 1971 г. Поскольку перемешивание атмосферы происходит достаточно быстро, их различие невелико — данные Мауна Лоа выше среднепланетных всего на 2-3 ppm. Систематическая разница возникает за счет того, что газ поглощается холодным океаном в приполярных широтах, а выделяется в атмосферу преимущественно в тропических.

В этих рядах легко заметить как многолетние направленные изменения (тренд), так и сезонные вариации (рис.2). Нас же интересуют межгодовые колебания, но их присутствие в исходных рядах увидеть непросто. Можно ли математически корректно отделить друг от друга эти вариации? Ответ заранее не очевиден. В данном конкретном случае задачу помогают решить два обстоятельства. Во-первых, для вычисления сезонных колеба-

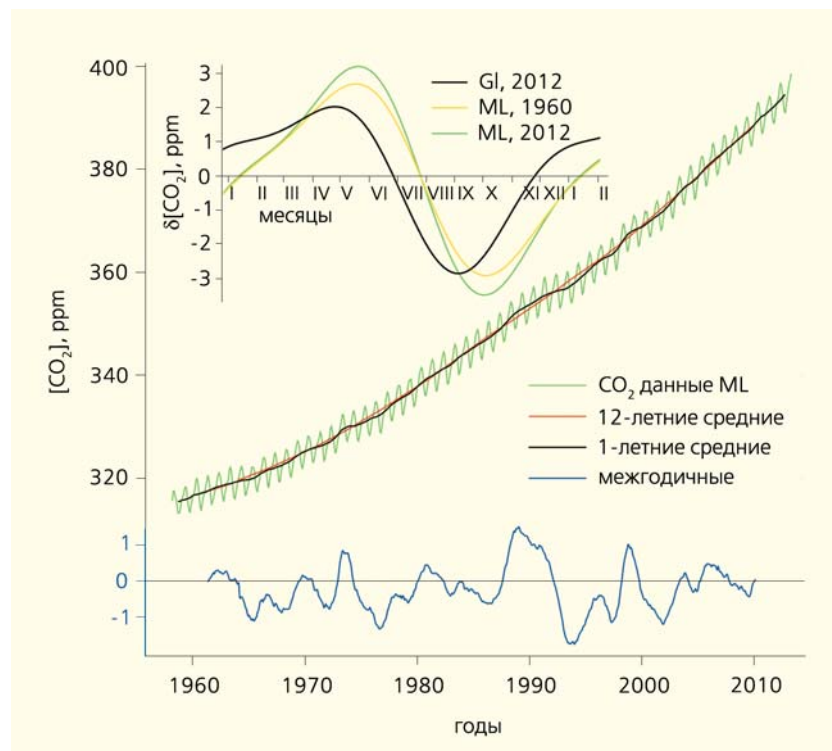


Рис.2. Концентрация  $\text{CO}_2$ , измеренная на о.Мауна Лоа (ML) [5], ее 1-летние и 12-летние средние. Внизу показаны межгодовые колебания концентрации  $\text{CO}_2$ , вычисленные как разность среднегодовых и 12-летних. На врезе даны сезонные колебания концентрации на о.Мауна Лоа в разные годы вместе с сезонными колебаниями концентрации, средней по планете (Gl).

ний есть физическая подсказка, а во-вторых, известно, как проверить, прошло ли разделение успешно: ошибки должны быть распределены по нормальному закону. Подсказкой служит тот факт, что климат каждой местности определяется сезонными вариациями солнечного излучения, в нем же присутствуют только две частотные моды: годовичная и полугодовая. Происхождение годовичных вариаций очевидно, а для понимания полугодовых надо вспомнить, что вблизи экватора как солнечная освещенность, так и температура проходят через максимумы и минимумы не один, а два раза в год. Для задачи разделения колебаний очень важно, что эти частоты — точные. Иначе говоря, климатическая температура каждой местности имеет в спектре только две частоты, годовичную и полугодовичную. Поэтому и сезонные вариации концентрации  $\text{CO}_2$  над океаном, реагирующие на температуру вод, имеют только две эти частоты с амплитудами, зависящими от широты. Другая ситуация складывается, например, для спектра приливов: у него много частот, поскольку движение Луны, которым вызваны приливы, обладает очень сложным спектром.

Будем измерять время  $t$  в годах, так чтобы момент  $t_0 = 2000.00$  соответствовал полночи 1 января 2000 года. Дни года будут представлены дробной частью даты. В согласии с физической подсказкой сезонные вариации концентрации  $\text{CO}_2$  следует искать в виде:

$$Q(t) = A(t)\cos(2\pi t + \psi_1) + B(t)\cos(4\pi t + \psi_2).$$

В амплитудах  $A$  и  $B$  можно учесть небольшой тренд, который за 60 лет приводит к росту сезонных колебаний примерно на 0.4 ppm. Сезонные колебания отделялись от тренда в ходе последовательных приближений. Из экспериментальных данных вычиталась составляющая, усредненная по бегущему годовичному интервалу, а в остающемся сезонном вкладе методом наименьших квадратов определялись амплитуды и фазы. В результате сезонные вариации концентрации  $\text{CO}_2$  на Мауна Лоа оказались такими:

$$Q(t) = [2.863 + 0.0074(t - t_0)]\cos[2\pi t + 4.335] + [0.7983 + 0.0025(t - t_0)]\cos[4\pi t + 0.5752].$$

Таковую же сезонную зависимость дает и аналогичное вычисление по еженедельным данным

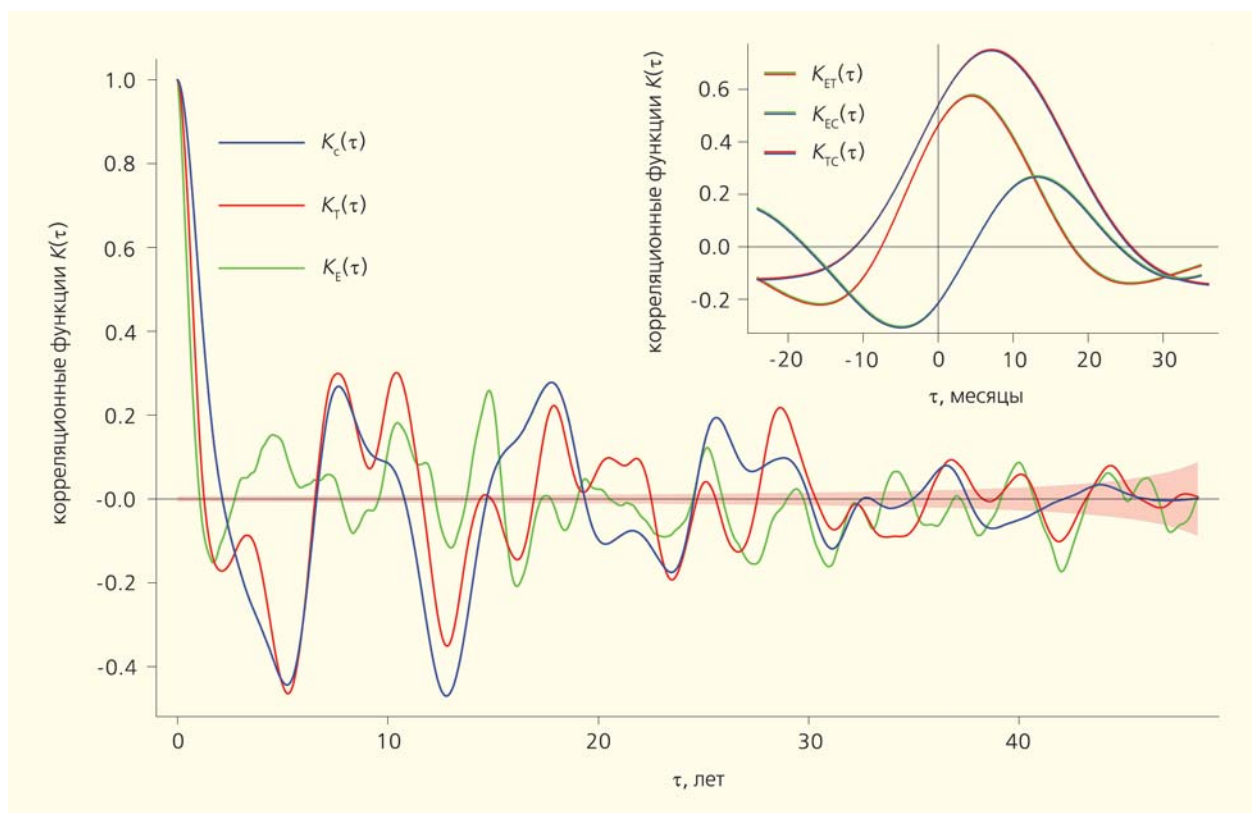


Рис.3. Корреляционные функции межгодовых колебаний, вычисленные по коротким (60-летним) рядам данных индекса ЭНСО  $K_E(t)$ , глобальной температуры  $K_T(t)$  и атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$   $K_C(t)$ . Область 1 $\sigma$ -ошибок (заливка) получена сравнением с корреляторами длинных рядов. На врезе показаны интеркорреляции (ковариации) последовательностей межгодовых колебаний  $K_{ET}(t)$ ,  $K_{EC}(t)$  и  $K_{TC}(t)$ . Высота максимумов свидетельствует о силе взаимозависимостей, их положения показывают задержки по фазе (лаги). Колебания индекса ЭНСО опережают другие показатели, а межгодовые колебания концентрации  $\text{CO}_2$  отстают по фазе от остальных.



(врез на рис.2). Сезонный ход средней по планете концентрации оказался несколько иным, его амплитуда меньше. Это различие сезонных кривых не влияет на общую среднегодовую зависимость, она одинакова для всей планеты. Ее широтные вариации связаны с тем, что поглощение  $\text{CO}_2$  происходит в полярных широтах, выделение океаном — в тропических, а антропогенные выбросы доминируют в Северном полушарии.

Если вычесть из экспериментальных данных сезонную зависимость и среднегодовую скользящую среднюю, останется ряд ошибок, вызванных, по-видимому, погодными вариациями давления и погрешностями эксперимента. Справедливость процедуры отделения сезонных вариаций подтверждается тем, что эти ошибки равномерны по всему периоду измерений, а их распределение практически совпадает с нормальным при среднеквадратичном отклонении 0.4 ppm.

Таким образом, экспериментальный ряд концентрации  $\text{CO}_2$  удастся разложить на сумму сезонных вариаций, среднегодового тренда и ошибок, вызванных погодными возмущениями. Далее используется процедура, уже проверенная на температурных рядах: межгодовые осцилляции выделяются вычитанием из ряда, усредненного с годичным скользящим периодом усреднения по 12-летнему скользящему окну.

Колебания концентрации  $\text{CO}_2$  вычислены в интервале времени от 1961 по 2010 гг. Сравнение их корреляторов разумнее проводить с рядами примерно той же протяженности, т.е. не с историческими, а с современными последовательностями поверхностной температуры и индекса ЭНСО (рис.3). Диапазон ошибок корреляторов в области больших времен получен сравнением расчетов с аналогичными расчетами по историческим рядам.

### Разности фаз межгодовых колебаний

В сезонных осцилляциях концентрации  $\text{CO}_2$  на Мауна Лоа годичная и полугодовая моды колебаний находятся в точном резонансе: форма годичных вариаций почти не меняется со временем, лишь немного возрастая по амплитуде. В других местах планеты сезонные зависимости газовых концентраций иные, но резонанс этих двух частот, судя по всему, сохраняется везде. Это не удивительно, поскольку причиной такой связи служат осцилляции освещенности данной широты Солнцем (инсоляции), приводящие к двухчастотной сезонной зависимости климатической температуры.

В межгодовых колебаниях, как следует из их спектра, разные частоты одной зависимости не кратны между собой, а при резонансе разных функций (температуры, ЭНСО-индекса и концентрации  $\text{CO}_2$ ) между ними естественно возникает

некоторая разность фаз. Иными словами, колебания одних зависимостей опережают другие или отстают от них. Для каждой частоты по отдельности вычислять этот лаг мы не умеем, но в целом последовательность запаздываний можно установить. Математический метод для этого следующий: надо вычислить интеркорреляционную функцию — ковариацию двух рядов  $f_1(i)$  и  $f_2(i)$  — почти по тому же способу, каким вычислялась автокорреляция одной функции [2]:

$$K_{12}(2r) = D_1^{-1/2} \sum_{i=1+r}^{N-r} f_1(i-r) f_2(i+r);$$

$$D_{12} = \sqrt{D_1 D_2}; \quad K_{12}(r) = K_{21}(-r).$$

Здесь  $D_1$  и  $D_2$  — дисперсии рядов, а при перемене функций местами ковариация отражается симметрично вертикальной оси. Величина этой функции при нулевом аргументе очевидно меньше единицы и может быть ей равна только при полном резонансе двух колебаний. Если корреляционные функции и спектры обеих зависимостей близки между собой (только этот случай нас и интересует), при больших значениях аргумента  $r$  ковариация  $K_{12}(r)$  становится похожа на корреляторы этих рядов. Поэтому имеет смысл вычислять ее при достаточно малых разностях  $r$  вплоть до перемены знака. Эта функция имеет максимум при небольшом сдвиге  $r = r_m$ , он называется лагом. Важны два обстоятельства: какой знак имеет  $r_m$  и насколько максимум ковариации меньше единицы. Если лаг положительный, то первая функция (ряд данных) лидирующая, а вторая отстаёт от нее в среднем на расстояние  $r_m$ . Если же знак отрицательный, то напротив, лидирует вторая зависимость (иначе говоря, можно переобозначить функции, заменив 1 на 2). Величина же ковариации в максимуме свидетельствует о том, насколько сильна взаимосвязь двух функций. Если расстояние  $r_m$  много меньше характерного периода, а  $K_{12}(r_m)$  достаточно близка к единице, можно осторожно утверждать, что между ними существует причинная зависимость.

На врезе рис.3 представлены ковариации между ЭНСО-индексом, температурой и межгодовыми вариациями  $\text{CO}_2$ , вычисленные по 60-летним рядам одной длины. ЭНСО-зависимость опережает все остальные, а предсказательность этого индекса довольно велика, поскольку коэффициент его корреляции с температурой равен 0.57. Глобальные вариации температуры отстают от ЭНСО на 4.5 месяца, а концентрация диоксида углерода — на 13 месяцев, впрочем, его корреляция с индексом Эль-Ниньо оказалась низкой. Наиболее сильно коррелируют между собой температура и концентрация диоксида углерода, в максимуме их ковариация равна 0.74, а ее отставание от температуры составляет более полугода. Отметим также, что три интеркорреляционные функции оказались согласованными между собой как по лагам, так и по высоте максимумов.

## Спектры межгодовых колебаний

Фурье-преобразование функций корреляции дает спектральные зависимости рядов случайных данных (метод Винера—Хинчина был описан ранее [2]). Спектры межгодовых колебаний, вычисленные как по длинным, так и по коротким рядам, изображены на рис.4. Этот график показан до частоты  $4 \text{ год}^{-1}$  по той причине, что при более высоких частотах в спектрах не обнаружено никаких особенностей. В частности, нет пика на годичной частоте  $2\pi$ . Его и не должно быть, поскольку во всех рассмотренных рядах данных сезонные колебания изначально были удалены. Выводы, к которым привел спектральный анализ климатических рядов, оказываются весьма содержательными.

Прежде всего, отметим многократное совпадение пиковых частот, полученных по разным данным и по рядам разной протяженности. Три основные линии спектра с достаточной точностью совпадают по всем рядам данных: этим частотам соответствуют периоды  $T_1 = 8.8\text{--}9.2$ ;  $T_2 = 3.64$ ;  $T_3 = 2.45$  (все периоды в годах). Разница нескольких частот моды  $T_1$  кажется слишком большой, но заметим, что один пик спектра  $\text{CO}_2$  окружают два температурных пика (второй с периодом 7.5 лет), а в самом спектре концентраций  $\text{CO}_2$  вблизи этой частоты виден излом.

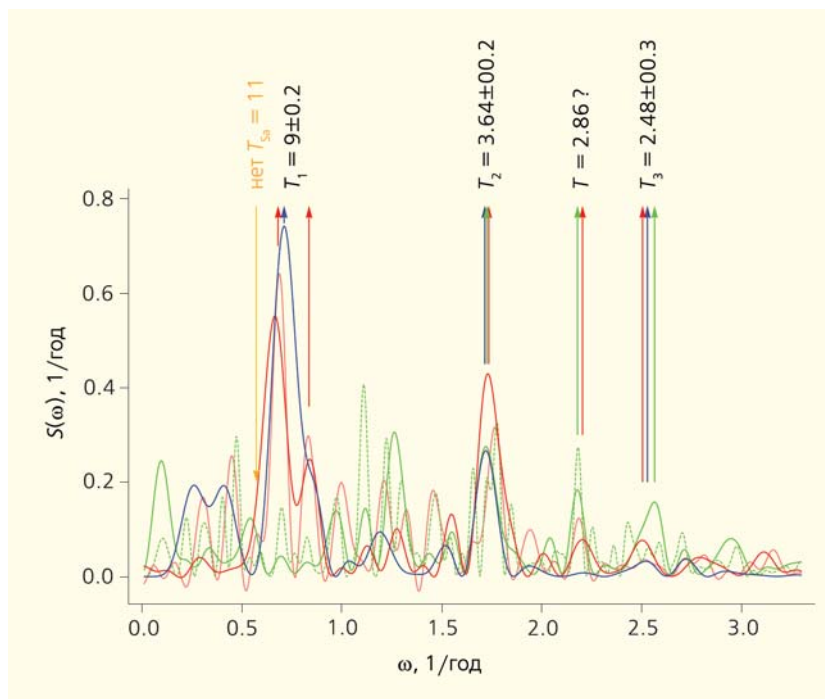


Рис.4. Спектры межгодовых колебаний, вычисленные по коротким рядам данных индекса ЭНСО, коротким и длинным рядам глобальной температуры, в также по данным атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  на Мауна Лоа. Главные спектральные максимумы совпадают с точностью вычислений для всех переменных; эти резонансы свидетельствуют об их высокой взаимозависимости. В спектрах не выявлен пик, соответствующий периоду солнечной активности 11 лет.

Поскольку низкочастотные колебания оказались доминирующими, не будем использовать для них термин «квазидвухлетние»; он имеет скорее метеорологическое происхождение.

Совпадение двух спектров вариаций температуры вполне естественно, поскольку расхождения источников данных незначительны. Различия по высоте основных линий спектра между короткими и длинными рядами также объяснимы: длинные ряды дают больше информации о низких частотах. Наиболее важный результат — почти точное согласие основных пиковых частот у спектров, полученных из ряда измерений  $\text{CO}_2$ , с остальными спектрами. Это совпадение, обнаруженное математически, позволяет сделать физическое утверждение о высокой взаимосвязи температуры земной поверхности и концентрации диоксида углерода.

Менее точное соответствие максимумов наблюдается у спектров, полученных по индексам ЭНСО, кроме того, они выявляют несколько собственных частотных пиков, хотя и более низких по сравнению с двумя основными периодами. Важной особенностью спектра климатической системы Земли в целом служит тот факт, что в нем много несоизмеримых частот: резонансы отсутствуют как между ними самими, так и с частотой годичного периода. Качественно это свидетельствует в пользу автоколебательного происхождения межгодовых осцилляций.

Как могут возникать автоколебания? Поверхность планеты — это самое теплое место по сравнению как с высотами атмосферы, так и с глубинами океана. На поверхности происходит максимальное поглощение потока солнечной энергии, переводящее его в тепло. Практически вся эта тепловая энергия нагревает тонкий слой поверхности океана и суши, а затем переносится конвекцией атмосферы вверх. Там, на высотах 8—12 км, она излучается в космос в микроволновом спектральном диапазоне. И совершенно естественно, что тонкая теплая область высот и глубин вблизи поверхности, где поглощается энергия, оказывается неустойчивой по отношению к произвольным возмущениям. Но эта неустойчивость не приводит к экспоненциальному росту — она ограничена, возмущения не развиваются как угодно сильно, а проявляются как автоколебания.

Что же касается возможного резонанса межгодовых колебаний с вариациями длительности земных суток, то приходится констатировать его отсутствие. В спектре вращения Земли [2] обнаруживаются очень узкие линии, соответствующие периодам, равным году, полугоду и аномалистическому лунному месяцу (27.55 сут.), есть там и менее уверенный пик на частоте сароса (период повторения лунных затмений, около 18 лет). Ни одной близкой или кратной этим частотам нет в спектре земной климатической системы. Поэтому можно утверждать, что вариации вращения Земли не воздействуют на межгодовые колебания в диапазоне частот от полугода до десятилетия. Отсутствие влияния Луны на погоду в масштабе месяцев полностью отрицать пока нельзя: такие высокие частоты спектра невозможно извлечь из наблюдательных данных с месячной или даже недельной периодичностью. С этой точки зрения исследование ежедневных данных концентрации диоксида представляло бы значительный интерес.

Как видно из спектров межгодовых климатических колебаний, в них нет и линии, соответствующей 11-летнему периоду солнечной активности. Таким образом, распространенное утверждение, что климат планеты зависит от вариаций активности Солнца, не находит своего подтверждения.

## Совпадения и расхождения

Изложенные результаты в целом известны научному сообществу: в статье О.Умлума [6], вышедшей год назад, рассматривалась по сути та же самая задача. В ней исследовались другие, более короткие (с 1980 г.) последовательности данных, а также антропогенные и вулканические выбросы  $\text{CO}_2$ , проводилось наглядное сравнение рядов, применялись иные методы вычисления спектров и ковариаций между температурой и концентрацией  $\text{CO}_2$ . Но в целом наши главные результаты совпадают (см. табл.).

Совпадение надо признать высоким, если учесть, что источники разной длины анализировались различающимися математическими методами. Один из максимумов спектра (период  $T_3$ ) совпал с точностью вычислений. Другой, соответствующий периоду  $T_2$ , оказался достаточно близок. Наиболее высокие максимумы спектров данной работы отвечают периоду  $T_1$ , равному 9.2 лет

по спектру температуры и 8.8 лет по спектру  $\text{CO}_2$ . Вследствие краткости рядов данных, изученных Умлумом, этот пик находится в области ошибок его вычислений, тем не менее, в спектре  $\text{CO}_2$  им отмечен максимум при периоде 8.7 лет.

Интер-корреляции между температурой и концентрацией  $\text{CO}_2$  в работе Умлума существенно слабее, чем у нас, но причина тут, видимо, иная: отделение сезонных колебаний диоксида углерода в настоящей работе проведено более точно. Наконец, в обоих исследованиях совпало важное качественное соотношение: вариации температуры поверхности *опережают* межгодовые колебания  $\text{CO}_2$ ; различие лагов по величине не имеет принципиального значения.

Однако наши выводы из последнего результата отличаются кардинально. Цитирую Умлума: «*Поскольку причина всегда должна предшествовать явлению, то это наблюдение показывает, что современные температурные изменения вообще не вызваны изменениями атмосферного  $\text{CO}_2$* ».

Согласиться с этим категорически невозможно. В этом утверждении присутствует логическая ошибка. В обеих наших работах анализировались колебания, а в любом колебательном процессе разность фаз между двумя переменными (например, координатой и скоростью маятника) не есть свидетельство ни причины, ни следствия. Или, если угодно, она свидетельствует о постоянной связи причин и следствий. Поэтому ни отставание межгодовых колебаний  $\text{CO}_2$  от температуры, ни величина этого лага сами по себе не имеют никакого отношения к глобальному потеплению. А вот взаимосвязь температуры и концентрации основного парникового газа отношение имеет и самое непосредственное.

## Температурно-диоксидные циклы

Завершим доказательство печальной ошибки авторов работы [6] — работы выдающейся, пионерской в лучшем смысле этого слова. Для наглядной демонстрации взаимосвязи колебаний температуры и диоксида углерода построим график их изменений за 60 лет в их собственных координатах, отмечая каждое пятилетие своим цветом (рис.5). При этом выбор осей графика безразличен, их можно менять местами.

По графику этой запутанной кривой можно проследить, как развивались колебания во време-

**Таблица**

**Сравнение результатов независимых расчетов**

	Период $T_2$	Период $T_3$	Лag T/ $\text{CO}_2$	Максимум T/ $\text{CO}_2$
О.Умлум	3.7–3.8 г.	2.4–2.5 г.	9.5–11 мес.	0.40–0.48
А.Бялко	3.64±0.02 г.	2.45–2.51 г.	7.2±0.1 мес.	0.74±0.01

ни. Представьте себе, что это не двумерная картина, а видеоклип. Стрелки показывают, куда были направлены изменения при больших отдалениях от начала координат. Нетрудно разглядеть, что при многочисленных случайных экскурсиях (метаниях) кривой в произвольных направлениях присутствует и общее движение, направленное по часовой стрелке. С 1955 по 2005 г.г. прошло несколько циклов обращения вокруг начала координат в отрицательном направлении, хотя изредка случалось также и движение в обратную сторону (против часовой стрелки). Эллипсоидальность этих циклов и есть истинная причина знака лага: большую часть времени температурные колебания действительно предвращают концентрационные. Поэтому и складывается ложное впечатление, что они доминируют в причинности. Образно говоря: «пони бежит по кругу», всегда опережая седоков, но управляет-то им кто?

Вытянутость температурно-диоксидных циклов позволяет вычислить уравнение средней прямой — найти регресс взаимозависимости  $\delta T(\delta[\text{CO}_2])$  или ей обратной:

$$\delta T = a\delta[\text{CO}_2]; \quad \delta[\text{CO}_2] = a^{-1}\delta T; \quad a = 0.05 \pm 0.02.$$

Здесь температура в градусах Цельсия, концентрация диоксида углерода в ppm.

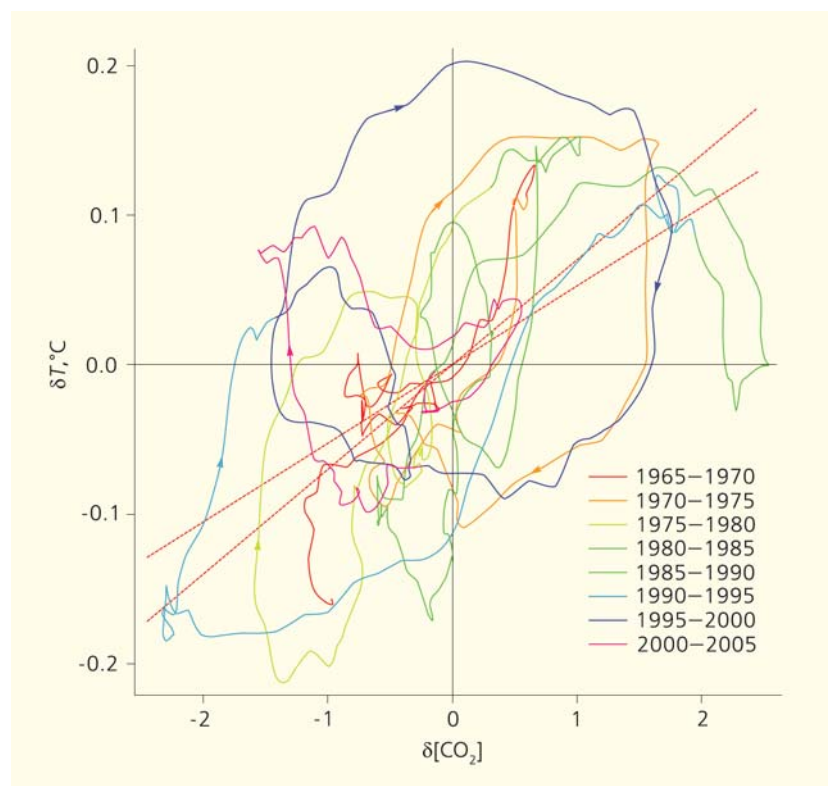


Рис. 5. Взаимозависимость колебаний глобальной температуры и диоксида углерода с 1965 по 2005 гг. Обратите внимание на эллиптическую вытянутость межгодовых циклов. Штриховыми прямыми даны линии регрессии и их разброс на уровне  $1\sigma$ .

Величина коэффициента регрессии  $a$  межгодовых циклов по порядку величины совпадает с аналогичным коэффициентом, вычисленным по восьми 100-тысячелетним циклам плейстоцена [7], там он оказался равен 0.098. Этот факт свидетельствует о том, что взаимосвязь температуры поверхности и главного парникового газа есть фундаментальное свойство земной климатической системы. Оно обеспечивается интенсивным газообменом между атмосферой и океаном. В последнее время, как мы увидим, оба его потока, из океана в атмосферу и обратно, быстро нарастают. Их можно вычислить отдельно и с приемлемой точностью, изучив, как и почему менялась атмосферная концентрация радиоуглерода [8].

### Газообмен $\text{CO}_2$ по изменениям концентрации радиоуглерода

Изотоп углерода  $^{14}\text{C}$  постоянно образуется в земной атмосфере под действием космических лучей и распадается с периодом полураспада  $T_{14} = 5830$  лет. В виде диоксида углерода  $\text{CO}_2$  вместе со стабильными изотопами  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$  он участвует во всех биохимических процессах, а также в газо-

обмене с водами океана. Относительная концентрация радиоуглерода очень мала, ее порядок величины всего лишь  $10^{-18}$ , но измерения интенсивности его распада счетчиками Гейгера позволяют определять концентрацию радиоуглерода почти с той же точностью, как и стабильных изотопов.

В современной истории радиоуглерода отчетливо видны несколько совершенно разных этапов (рис. 6). До начала индустриальной революции атмосферная концентрация  $^{14}\text{C}$  была почти постоянна, она менялась только от небольших вариаций потока космических нейтронов. Углерод живого вещества постоянно обновляется при питании и дыхании, но после умирания организма обмен прекращается, и концентрация радиоуглерода закономерно уменьшается. В частности, это открывает возможность точно датировать момент смерти организма по его останкам. Калибровка радиоуглеродного анализа до возраста 11 тыс. лет проводится с помощью дендрохронологии, а до 50 тыс. лет — по озерным осадкам.



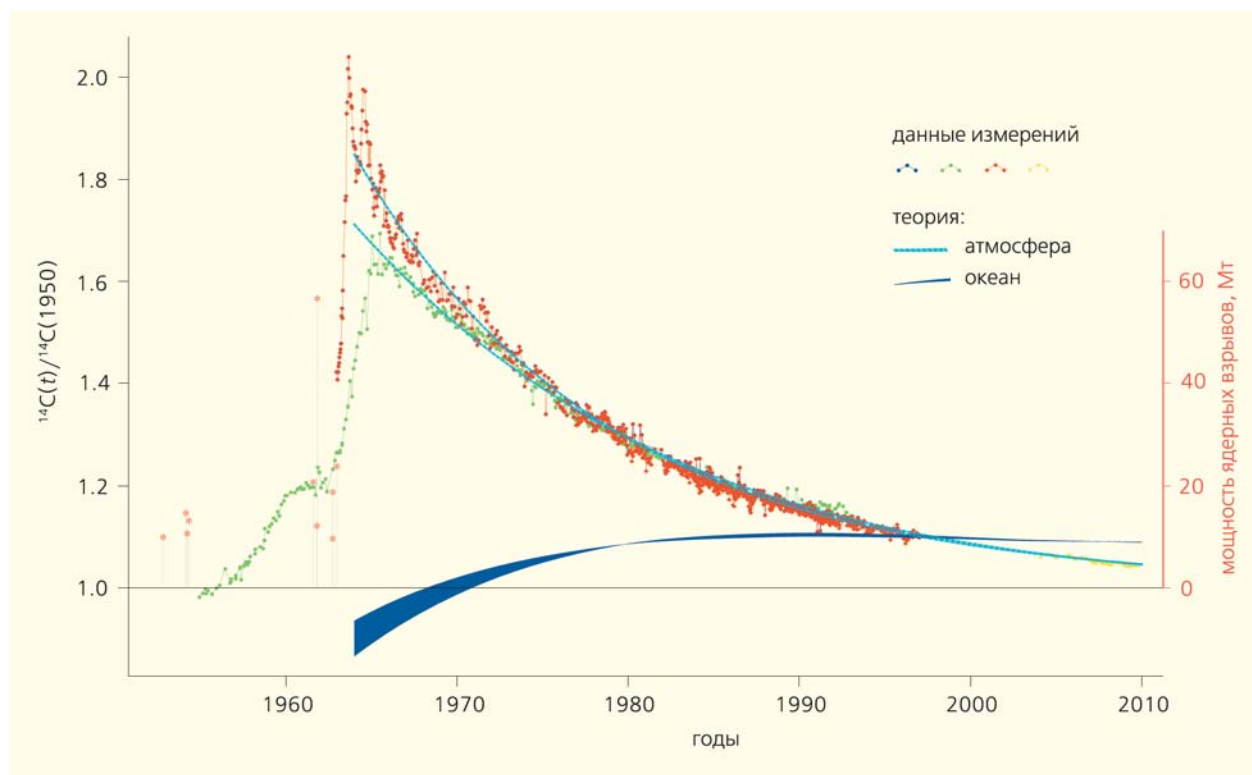


Рис.6. Изменения концентрации радиоуглерода в современную эпоху. Значками даны измерения атмосферной концентрации  $^{14}\text{C}$  по данным разных источников. Две штриховые кривые показывают годичное усреднение этих данных в Северном и Южном полушариях. Сплошная синяя линия соответствует вычислениям концентрации  $^{14}\text{C}$  в поверхностном слое океана. Звездочками отмечены моменты крупнейших испытаний ядерного оружия в атмосфере и их мощность.

После 1880 г. промышленная революция инициировала ускоряющееся сжигание ископаемых топлив (угля, нефти, газа). Поскольку они не содержат радиоуглерода, его относительное содержание в атмосфере стало понижаться. Это явление называется эффектом Суэсса (он обратил внимание на данный факт в 1955 г.). Новый этап начался с середины 50-х годов в результате серии атмосферных испытаний мощного ядерного оружия. Нейтроны, образующиеся при ядерном взрыве, взаимодействуют с азотом воздуха, приводя к образованию радиоуглерода. Содержание  $^{14}\text{C}$  стало резко нарастать. В 1958 г. академик А.Д.Сахаров указал на негативные биологические последствия роста концентрации радиоуглерода [9]. Его статья сыграла важную роль при заключении международного договора о запрещении ядерных испытаний в атмосфере, который вступил в силу в октябре 1965 г. К этому моменту естественный фон радиоуглерода оказался превышен примерно вдвое.

После прекращения атмосферных ядерных испытаний последовало весьма быстрое падение атмосферной концентрации  $^{14}\text{C}$ . Отклик планеты на резкое увеличение количества радиоуглерода оказался совсем не таким, каким он представлялся в конце 50-х годов. Вывод Сахарова о долговре-

менном воздействии радиоуглерода на биоту не учитывал роль газообмена атмосферы с океаном, параметры которого в 50-х годах были неизвестны. Тем не менее воздействие ядерных взрывов на содержание радиоуглерода будет справедливо называть эффектом Сахарова.

Главную роль в понижении атмосферной концентрации радиоуглерода после 1965 г. сыграл океан, который активно обменивается с атмосферой легко растворимым диоксидом углерода и служит его мощным резервуаром. Меньший, но также заметный вклад продолжает вносить сжигание ископаемых топлив.

Не станем утомлять читателя выводом дифференциальных уравнений, описывающих естественную связь изменений концентраций радиоуглерода и обычных его изотопов. Важным следствием этих уравнений стало утверждение, что не так давно концентрации радиоуглерода в атмосфере и океане достигли равновесия. Этот момент (20-е числа ноября 1990 г.) оказалось возможным вычислить с точностью около полутора лет. Точность здесь ограничена только разбросом наших сведений о том, как много ископаемых топлив было сожжено в 90-х годах.

Количественный учет антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  и его поглощения океаном (вместе с вхо-

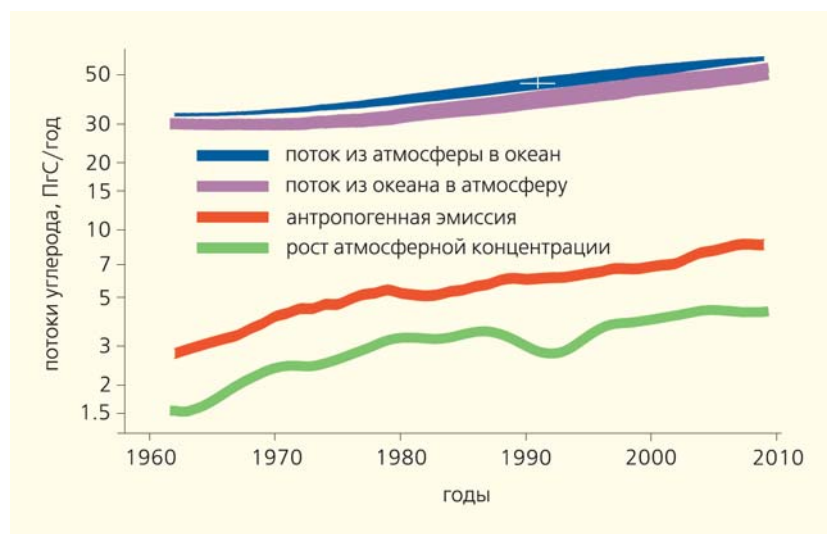


Рис.7. Временные зависимости потоков углерода в составе  $\text{CO}_2$ , вычисленные на основе анализа современных изменений концентрации изотопа  $^{14}\text{C}$ . Показаны изменения атмосферной концентрации углерода, поступление углерода от сжигания ископаемых топлив, обмен между океаном и атмосферой. Толщина кривых соответствует ошибкам их восстановления, в частности, показана величина ошибки  $U(t_0)$ . Кривая обратного потока углерода из атмосферы в океан лежит в пределах ошибок кривой прямого потока.

дядим в него радиоуглеродом) позволяет вычислить меняющуюся интенсивность взаимобмена  $\text{CO}_2$  между океаном и атмосферой (рис.7). Оба этих потока оказались меньше, чем общепринятые значения 90 и 92 ПгС/год (петаграмм углеро-

ее поглотить. Рассуждения о том, что антропогенные выбросы в недалеком будущем прекратятся сами собой по причине исчерпания ископаемых топлив, крайне наивны. Самоограничение человечеством добычи угля и нефти неизбежны. ■

да в год); они приведены в этом номере в статье А.В.Елисеева (с.10–16). Не так важно само уточнение, как то, что оба потока возрастают со временем более или менее пропорционально антропогенным выбросам.

Это означает, что воздействие парникового эффекта на глобальное потепление существенно компенсируется поглощением океаном. Но надо понимать, что возможность океана поглощать основной парниковый газ отнюдь не беспредельна. Потенциальную емкость океана по отношению к  $\text{CO}_2$  надо сравнивать с полной массой углерода, запасенного в недрах планеты за всю историю планеты. Такую оценку нетрудно получить, поскольку весь кислород атмосферы образовался в процессе фотосинтеза одновременно с захоронением угля и нефти в недрах. Эта масса углерода колоссальна, она на несколько порядков выше возможности океана

## Литература

1. Earth System Research Laboratory Extended Multivariate ENSO Index\*: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei.ext>  
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei.ext/table.ext.html>
2. Бялко А.В. Спектр возмущений земных суток // Природа. 2013. №8. С.63–67.
3. National Climatic Data Center\*: [ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/monthly.land\\_ocean.90S.90N.df\\_1901-2000mean.dat](ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/monthly.land_ocean.90S.90N.df_1901-2000mean.dat)
4. Goddard Institute for Space Studies\*: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata/HLB.Ts+dSST.txt>
5. Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division\*: [ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2\\_mm\\_mlo.txt](ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_mm_mlo.txt);  
[ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2\\_mm\\_gl.txt](ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_mm_gl.txt)
6. Humlum O., Stordahl K., Solheim J. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature // Global and Planetary Change. 2013. V.100. P.51–69.
7. Бялко А.В. Релаксационная теория климата // УФН. 2012. Т.182. С.111–116.
8. Бялко А.В. Вариации концентрации радиоуглерода и газообмен атмосфера—океан // Докл. РАН. 2013. Т.451. С.28–32.
9. Сахаров А.Д. Радиоактивный углерод ядерных взрывов и непороговые биологические эффекты // Атомная энергия. 1958. Т.4. С.6–12.

\* Данные получены в мае 2013 г.

# Секреты золотого гиганта

А.М.Портнов

Золото неизменно погружало людей нашей цивилизации в подобие наркотического безумия. Металлический символ богатства и успеха действовал на человеческий мозг, как безусловный пищевой рефлекс на собаку в лаборатории академика И.П.Павлова. Золотая лихорадка была тяжелой болезнью, сопровождавшей нашу историю на протяжении тысячелетий. Охота за желтым металлом породила бесчисленное количество войн, преступлений, убийств. Но в то же время золото способствовало познанию мира, развитию промышленности, технологий, экономики, общества.

С учетом данных В.П.Полева, количество золота, добытого человечеством к 2013 г., можно оценить примерно в 175 тыс. т [1]. Самым богатым оказался африканский континент, здесь добыто примерно 70 тыс. т. Но настоящая золотая кладовая Африки — знаменитый Витватерсранд, где из гигантских рудников получено около 55 тыс. т желтого металла. Почти столько же осталось в недрах этого уникального месторождения. Гигант, из которого извлекли треть всего золота планеты, был открыт совсем недавно. Эта находка спасла человечество от экономического «золотого кризиса» на рубеже XIX—XX вв.

В 1877 г. известный австрийский геолог Э.Зюсс опубликовал статью, вызвавшую панику в финансовых и промышленных кругах европейских государств.



*Александр Михайлович Портнов, доктор геолого-минералогических наук, профессор Московского государственного геологоразведочного университета им. С.Орджоникидзе. Область научных интересов — минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых. Постоянный автор «Природы».*

Публикацию рассматривала специальная комиссия германского рейхстага. В разгоревшейся дискуссии приняли участие многие специалисты — геологи, экономисты, историки. Что же так взволновало общественность?

Оказывается, Зюсс предсказывал экономический крах нашей цивилизации вследствие грядущего неизбежного дефицита золота — основы мировой финансовой системы того времени. Собрав данные об известных месторождениях благородного металла, темпах его добычи и росте потребления, ученый рассчитал, что вскоре возникнет катастрофический дефицит золота, так как спрос на него резко превысит предложение.

Однако мировой валютный кризис не состоялся. Спасение пришло неожиданно — из Южной Африки. В 1886 г. фермер Дж.Уолкер, живший вблизи Йоганнесбурга, заметил в камне блески латунного цвета [2]. На всякий случай он раздробил породу и промыл песок в тазу с водой. Как часто бывает у новичков-золотоискателей, Уолкер ошибся: отливающие латунью зерна оказались не золотом, а пиритом — сульфидом железа ( $\text{FeS}_2$ ), не имеющим особой ценности.

Но фермеру невероятно повезло: вместе с пиритом на дне таза змеилась тонкая ярко-желтая полоска настоящего золота! Действительно, иногда в породах, несмотря на низкое (5—8 г/т) содержание золота, встречаются его видимые зерна, а Н.А.Шило показывал мне золотую пластину из конгломератов (цементированных галек) Витватерсранда размером с пол-ладони!

Так было открыто золото Витватерсранда, величайшего в мире скопления драгоценного металла. Ежегодно здесь добывали до 1200 т золота! Впоследствии ценность месторождения возросла, поскольку оказалось, что в рудах концентрируется также и уран. Благодаря мощному притоку южноафриканского золота мировой финансовый кризис не состоялся.

Естественно, что уникальный золоторудный гигант привлек всеобщее внимание: геологи всех стран пытались найти его аналоги. Советские космонавты разглядели вроде бы похожую геологическую структуру в Карелии, но проверка не дала положительных результатов. Удивительная особенность месторождения заключалась в сочетании простоты геологического строения и неразрешимых загадок, которые возникали при его изучении. Рудные залежи были расположены среди осадочной сланцево-песчанистой толщи. Они казались пластами галечников-конгломератов, очень похожих на современные речные или прибрежные морские золотоносные россыпи.

В конце прошлого века основную массу золота добывали из россыпей Урала, Сибири, Колымы, Аляски, Калифорнии и Австралии. Геологи Витватерсранда были убеждены, что и в Южной Африке также открыты гигантские древние россыпи. Считалось, что они образовались при размыве древними протерозойскими реками еще более древних коренных месторождений золота. Это мнение вошло в научные монографии и учебники всего мира.

### Загадки Витватерсранда

По мере изучения знаменитого месторождения возникали вопросы, на которые не было ответов. Например известно, что вблизи россыпей находятся остатки коренных месторождений. За их счет россыпи и формировались. В рудных пластах Витватерсранда природа собрала более 100 тыс. т золота, по меньшей мере еще столько же содержится в окружающих пластах с непромышленным содержанием металла. В россыпи переходит лишь часть коренного золота, а значительное его количество истирается и бесследно рассеивается. Значит, в коренных месторождениях, за счет которых возникли древние южноафриканские россыпи, насчитывалось не менее полумиллиона тонн благородного металла!

Между тем крупным коренным месторождением золота геологи называют объект с запасами в 100—200 т. Возникает естественный вопрос: где же находились *тысячи* гигантских глубинных месторождений золота, а также многочисленные скопления урана? В Южной Африке до сих пор не найдены крупные коренные месторождения этих металлов. Если даже предположить, что они стёрты эрозией с лица Земли, то для них просто не найдется достаточного места.

Подсчеты показывают, что в рудных полях Витватерсранда на площади в 100 тыс. км<sup>2</sup> насыщенность золотом достигает 2 т на каждый квадратный километр! Откуда оно было принесено? Ни одна гипотеза не может указать на источник сноса такого чудовищного количества россыпного золота.

Другая загадка касается состава древних галечников. Уже первооткрыватель фермер Уолкер обратил внимание, что в конгломератах, состоящих из галек молочно-белого жильного кварца, содержится много пирита. Но обычно пирит образует кубические кристаллы, а здесь он окатан и похож на блестящие шарики (рис.1). Геологи Южной Африки в зависимости от величины называют его пиритовой дробью или картечью. Окатаны зерна и уранового минерала — уранинита (UO<sub>2</sub>).

Загадка заключается в том, что и пирит, и уранинит, в отличие от кварца, минералы неустойчивые. На поверхности Земли они легко разрушаются и исчезают. В современных речных россыпях их практически не бывает. Нет окатанных неустойчивых минералов и в древних россыпях палеогена, мезозоя, палеозоя и докембрия, например в древнейшей архейской россыпи на Кольском п-ове [3]. Почему же окатанные пирит и уранинит в таком количестве сохранились в речных галечниках Витватерсранда?

Долгое время считалось, что в раннем протерозое в атмосфере Земли не было кислорода, и потому пирит сохранялся в речных песках. Однако современные изотопные анализы кислорода и серы в протерозойских осадках дают однозначный ответ: кислород в те времена присутствовал в атмосфере, и в немалых количествах. Геологическое подтверждение тому — многокилометровые пласты осадочных толщ железистых кварцитов позднего архея и протерозоя, состоящих из оксидов железа. Такие «ржавые» осадки возникают лишь при наличии в атмосфере кислорода, окисляющего пирит.

Между тем пиритовой гальки в рудных пластах Витватерсранда так много, что для получения серной кислоты попутно здесь в год добывают 500 тыс. т пирита. А стоимость окатанного урани-

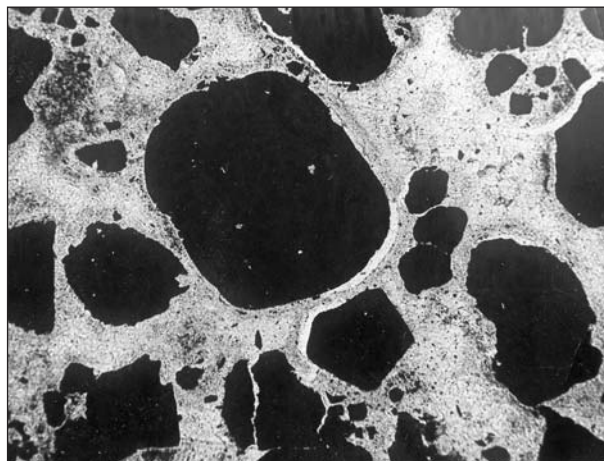


Рис.1. Пиритовые и кварцевые гальки с зернами золота. Полированный шлиф. Месторождение Витватерсранд. Увел. 5.

Здесь и далее фото автора



нита отсюда составляет 10% от стоимости золота. Почему сохранились в россыпях минералы, неустойчивые в условиях земной поверхности? Ответа на этот вопрос тоже нет.

Наконец, удивительным оказался и возраст разных пластов руды. Разведка выявила около двух десятков пластов, залегающих друг над другом в 10-километровой толще древних песчаников и сланцев. Возраст нижних толщ 2.5 млрд лет, а верхних — 1.9 млрд, т.е. 10 км осадков накопились здесь за 600 млн лет.

Между тем возраст всех пластов рудных галечников одинаков — около 1.9 млрд лет, независимо от того, где они залегают: в нижней или верхней части разреза. Почему относительно молодые галечниковые руды переслаиваются с более древними песками и глинами? Это противоречит всем геологическим представлениям о закономерностях образования осадочных толщ!

Для объяснения этого парадокса, геологам пришлось предположить, что в процессе позднего изменения пород из неустойчивого уранинита (по которому определялся возраст конгломератов) была вынесена часть радиогенного изотопа свинца  $^{206}\text{Pb}$ . От этого уранинит «омолодился» до 1.9 млрд лет. Однако уранинит при детальном изучении оказался практически не измененным. Кроме того возраст сопровождающего его устойчивого радиоактивного минерала монацита (Ce,Th,U)[ $\text{PO}_4$ ] также оказался близким к возрасту уранинита.

Был установлен еще один парадокс: рудные галечники возрастом (по ураниниту и монациту) 1.9 млрд лет пересекались жилами, содержащими сульфид свинца — галенит ( $\text{PbS}$ ), в котором было так много радиогенного изотопа свинца  $^{206}\text{Pb}$ , что возраст галенита оценивался в 2.5—3.8 млрд лет, т.е. он оказался старше своих «прародителей». Так не бывает.

И что это за необычная река, которая существовала 600 млн лет и регулярно через десятки миллионов лет откладывала пласты рудных конгломератов? Срок жизни рек на земной поверхности относительно мал — всего несколько миллионов лет. Неразрешимых загадок оказалось так много, что геологи их просто перестали обсуждать. В литературе появился термин: «загадки Витватерсранда». Без намеков на их разрешение.

### Среднеазиатский близнец

Несмотря на все эти загадки, геологи продолжали считать Витватерсранд гигантской речной россыпью. Так продолжалось до тех пор, пока в Средней Азии, в пределах Бельтау-Кураминского вулканоплутонического пояса разведка не выявила крупные коренные месторождения золота в верхнепалеозойских вулканических породах. Здесь 300 млн лет назад поднимались огнедышащие горы, похо-

жие на Ключевскую сопку. Сейчас от вулканических конусов ничего не осталось, они уничтожены эрозией, но зато вблизи от поверхности оказались их рудоносные глубинные корни.

На месторождении Коч-Булак (Узбекистан) в трещинах андезитовой лавы из минерализованных растворов при температуре около 300°C отлагалось золото. Рудные тела представлены там двумя типами: обычными кварц-пиритовыми жилами и более поздними рудными столбами, которые прорывались кварцевыми жилами. Рудные столбы были насыщены окатанными обломками разных горных пород: валуны и галька окружающих андезитов перемешались с обломками кварцевых жил. Все они сцементированы кварцем с примесью пирита и золота.

В рудах Коч-Булака при проверке урановой аномалии, столь необычной для золоторудных месторождений, я с удивлением обнаружил зерна пирита странной формы, похожие на дробь или картель (рис.2). Можно было проследить, как типичные кубики пирита постепенно превращались в шарики. Геологи считали, что здесь имел место процесс растворения или даже плавления. Это ошибка:  $\text{FeS}_2$  не плавится, а при растворении возникают совсем другие формы.

Микроскопические исследования таких шариков показали, что причиной появления странных форм было... окатывание. Также наблюдались слоистые и косослоистые (как в обычных речных отложениях) скопления пиритового песка вместе с кварцевой галькой и валунами андезита. Здесь происходил совершенно неизвестный ранее процесс окатывания вмещающих горных пород и кварц-пиритовых жил в рудоносных подземных потоках!

Значит, в недрах вулкана бурлил «кипяток», а в нем неслись обломки андезитов, дробившие

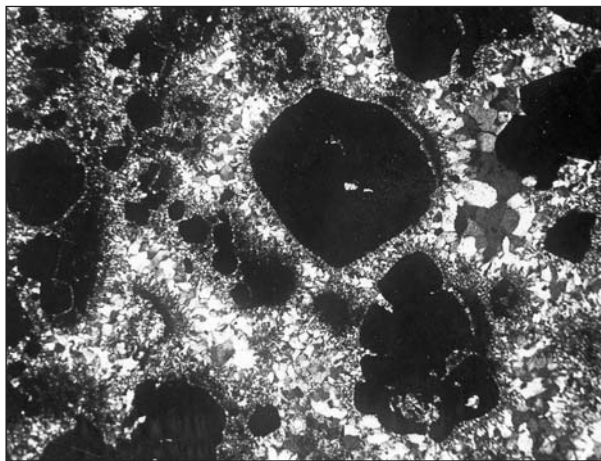


Рис.2. Галька пирита, родившегося в недрах вулкана, сцементирована кварцем с высоким содержанием золота. Месторождение Коч-Булак. Внешне она неотличима от «пиритовой дробли» Витватерсранда. Полированный шлиф. Увел. 5.



Рис.3. Окатанные подземными потоками и превращенные в «дробь» кристаллы пирита с золоторудного гиганта Южной Африки (верхний ряд) и пиритовая галька из рудных залежей Средней Азии. Увел. 5.



Рис.4. Золотоносные породы с «пиритовой дробью» из Витватерсранда (вверху) и из Коч-Булака практически не различаются. Увел. 3.

более ранние рудные жилы — так же, как их размалывают чугунные шары шаровых мельниц на горно-обогащительных фабриках. Водно-паровая смесь под давлением в тысячи атмосфер пробилла в лаве вертикальные трубы, наполнила их окатанными обломками минералов рудных жил и цементировала золотоносным кварцем.

Такую картину не описывали ранее ни научные монографии, ни учебники по геологии. Рудные залежи в Кураминских горах свидетельствовали о том, что конгломерат — цементированная галька — возникает не только в реках и озерах на поверхности Земли, но и в ее глубинах — в трещинах, заполненных рудообразующим кипящим раствором [4].

Золотоносные карц-пиритовые конгломераты Средней Азии внешне практически не отличались от... золотоносных конгломератов Южной Африки! Можно было подумать, что пиритовые галечки взяты с одного месторождения, а не возникли на разных концах Земли (рис.3). Даже цемент их был сходен. Помимо золота в них в десятки раз превышены кларки (средние содержания элементов в земной коре) урана и тория. Значит, нет нужды связывать золотоносные конгломераты Южной Африки с отложениями древних рек. Загадки Витватерсранда можно объяснить глубинным происхождением руды, за счет энергии флюидов — паров воды и газов, выделяемых магматическими расплавами (рис.4).

### Разгадки южноафриканских секретов

Главная загадка — источник золота. Россыпи вторичны, а первичное золото приносится из глубин Земли горячими минерализованными растворами, связанными с огромными массами расплавленной магмы. Золото Витватерсранда своим происхождением скорее всего обязано внедрению в земную кору огромного магматического Бушвельдского массива, площадь которого около 200 тыс. км<sup>2</sup>, а объем — более 1 млн км<sup>3</sup>! Рудные пласты окружают Бушвельд и уходят вглубь, к его корням. Рудное поле похоже на гриб, перевернутый шляпкой вниз: толстая ножка — магматический Бушвельдский интрузив, а шляпка — рудные залежи.

При остывании магмы выделилось огромное количество паров воды, которые вынесли уран и отложили его в кварц-пиритовых жилах среди окружающих осадочных пород. Затем последовал катастрофический прорыв богатых золотом газонасыщенных растворов, раздробивших ранние рудные жилы. Энергия бурлящих потоков превратила обломки сланцев и рудных жил в пласты подземных конгломератов, внешне не отличимых от речных. Золото же, пирит и урановые минералы оказались в цементе между гальками кварца.

Гипотеза о формировании рудоносных глубинных конгломератов позволяет решить «нераз-



решимые» геологические загадки. Возраст Бушвельдского интрузива составляет около 2 млрд лет, т.е. практически совпадает с возрастом всех рудных пластов. Рудные тела одновременно внедрились в мощную толщу осадочных пород при выделении из расплавленной магмы водно-газовых рудных растворов.

Бурные подземные «реки» Витватерсранда существовали тысячи лет, о чем свидетельствует окатанность валунов интрузивных пород, галек жильного кварца, зерен уранинита, пирита и других минералов. Растворимость воды в силикатном расплаве 2–4%. Это значит, что из 1 млн км<sup>3</sup> расплава Бушвельдского интрузива выделилось не менее 100 тыс. км<sup>3</sup> воды и газов, т.е. примерный объем сотни озер типа Ладожского — крупнейшего в Европе. Пробиваясь к поверхности, эти газонасыщенные потоки, нагретые до 300°C, страшным давлением раздвигали слои осадочных пород, дробили и окатывали жильные и рудные минералы.

Загадку, связанную с аномальным накоплением радиогенного изотопа свинца <sup>206</sup>Pb, удалось объяснить при изучении методами электронно-парамагнитного резонанса и эффекта Мёссбауэра кварцевой и пиритовой гальки из Средней Азии [5]. Оказалось, что окатанные глубинные минералы «хранят память» о полученной ими огромной дозе α-излучения (рис.5). В отличие от них поздние кварц и пирит в цементе конгломератов (хотя и содержали повышенные концентрации урана и тория) получили дозу облучения в 100–200 раз меньше. Какой радиоактивный элемент мог так сильно облучить гальку в кипящем растворе?

Как известно, мощный α-излучатель — радон. Он концентрируется в газовой фазе, а при кипении растворов может давать высокую дозу облучения. Видимо, подземные реки Средней Азии были буквально насыщены радоном — продуктом радиоактивного распада урана и тория.

Радон с периодом полураспада 3.8 сут переходит в радиогенный изотоп <sup>206</sup>Pb. Свинец оседает в виде тончайших пленок, которые легко разрушаются рудными растворами и осаждаются сероводородом в виде галенита. В этом случае галенит резко обогатится радиогенным изотопом свинца (именно поэтому аналитику его возраст покажется значительно древнее истинного).

С этим парадоксом и столкнулись геологи на Витватерсранде. «Молодой» галенит, пересекающий рудные пласты (из-за высокой концентрации радиогенного <sup>206</sup>Pb) обладал невероятно «древним» архейским возрастом. Но накопление <sup>206</sup>Pb легко объясняется обилием радона, выделяющегося из урановой руды. Впоследствии рассеянный радиогенный свинец сконцентрировался в поздних жилах, секущих рудные залежи.

Возможность формирования глубинных конгломератов (очень сходных с поверхностными) позволяет объяснить многочисленные загадки

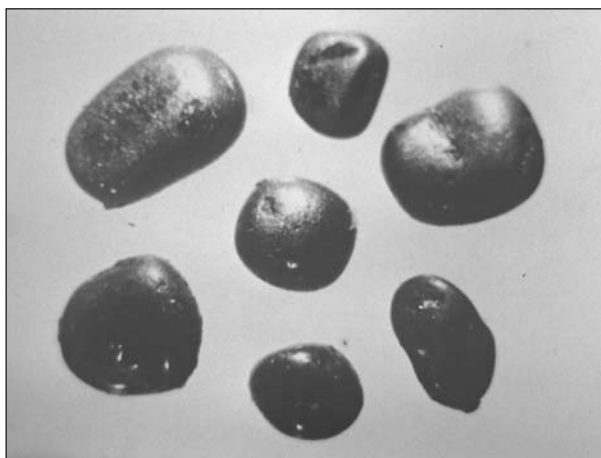


Рис.5. Пиритовая галька из золотоносной кварцевой жилы из месторождения Коч-Булак. Увел. 5.

и парадоксы. Наличие в относительно молодых палеозойских вулканических породах глубинных конгломератов, содержащих золото, может служить важным признаком при поиске золоторудных гигантов.

Раньше геологи были уверены в том, что богатое месторождение надо искать лишь в речных отложениях древних архейских пород, распространение которых на Земле очень мало. На активную роль магматических пород при этом внимание не обращалось. На самом деле рудоносные глубинные конгломераты формируются в тесной связи с магматизмом, вокруг огромных бассейнов жидкого глубинного расплава, который насыщен газами и парами воды, несущей редкие металлы. Возраст таких интрузивов может быть гораздо более молодым.

## Нет пророков в своем отечестве

Данную точку зрения, впервые высказанную мной еще в 1978–1980 гг. [4–6], советские геологи фактически не заметили и сейчас продолжают однообразно переписывать из учебника в учебник рассказы о «загадках речных русел Витватерсранда». Не заметили глубинную гальку Д.П.Григорьев и А.Г.Жабин, известные исследователи онтогении, т.е. морфологии минеральных агрегатов.

Но статья англичанина Р.Силитоу, написанная на ту же тему и опубликованная в 1985 г. [7], буквально потрясла советский геологический мир и стала обязательной ссылкой в отечественных публикациях о рудных месторождениях. Новизна была в том, что информация из-за границы сообщала о конвекции рудоносных растворов! Между тем в СССР под влиянием работ академика Д.С.Коржинского, большое значение придавалось диффузионному просачиванию глубинных растворов в породах и выравниванию в них концент-

раций растворенных компонентов. Заграничные «голоса» в то время (как и сейчас) обычно имели социальную значимость.

В действительности конгломераты отличаются от брекчий лишь длительностью обработки поверхности горных пород и минералов. Конгломераты — «высшая степень» изменения брекчий, свидетельствующая о большой энергии рудных водных потоков.

Трудно подсчитать, сколько «доброжелательных» отзывов мне пришлось получить от коллег. «Вы не были в Южной Африке, и потому Вам не следует решать такие проблемы» — написал в своем отзыве академик В.И.Смирнов, действительно крупнейший и уважаемый специалист по рудным месторождениям.

Академик А.А.Щеглов, будучи руководителем Дальневосточного научного центра, пригласил меня во Владивосток с серией докладов и внимательно прослушал сообщение о конгломератах. Потом он поехал на золотоурановые месторождения Витватерсранда. Вернувшись из ЮАР, он позвонил мне и сказал, что полностью разделяет мои воззрения. Но когда я попросил представить статью в журнал «Доклады Академии наук СССР», он потребовал так ее изменить, что смысл гипотезы исчез. Иные рецензенты отзывались проще: «Мнение автора абсурдно, поскольку противоречит научной доктрине рудных месторождений золота и урана...». Ну, и так далее.

Публиковать статьи на эту тему мне было крайне трудно. Однако я уверен, что инерция мышления в конце концов изменится. Геологи поймут, что процессы окатывания горных пород флюидными или гидротермальными потоками широко развиты в недрах Земли. Глубинные конгломераты

могут сопровождать алмазное, золотое, оловянное, урановое, полиметаллическое, флюоритовое и иные типы оруденений [8]. Ряд известных геологов уже разделяет мнение о глубинности конгломератов Витватерсранда. В их числе известные геологи и минералоги — Н.А.Шило, А.А.Кременецкий, С.П.Долгушин и др. [9].

Поскольку гипогенные конгломераты возникали не только в древнейшие эпохи жизни нашей планеты, искать их можно в более молодых породах, вокруг крупных гранитоидных массивов, в вулканических толщах. Для геологов-поисковиков это означает, что площади перспективных районов резко увеличиваются.

Конгломератовые текстуры, по моему мнению, встречаются также в колчеданных месторождениях Южного Урала, оловянных — Дальнего Востока, флюоритовых — Забайкалья. Кимберлиты тоже могли возникнуть как мантийные флюидизиты. В них неизменно присутствуют валуны эклогитов, окатанные ксеноморфные глубинные минералы (ильменит, пироп, апатит и др.), гидратированный оливин (серпентин) и алмазы, кристаллизующиеся в самих трубках из газа водородно-метанового состава [10].

При поисках рудоносных глубинных конгломератов надо помнить, что важнейший признак, позволяющий надежно отличить их от древних пляжных отложений морей, озер и речных русел, — наличие в них *окатанных минералов, неустойчивых на поверхности Земли*. Из них самый заметный и распространенный — именно тот галечниковый пирит, который заставил фермера Уолкера более века назад взять в руки таз для промывки кварц-пиритовых глубинных конгломератов Южной Африки. ■

## Литература

1. Полеванов В.П. Диагноз: золотая лихорадка // Природа и СВЕТ. 2011. №1. С.38—43.
2. Марфуни А.С. История золота. М., 1987. С.99.
3. Портнов А.М. Древнейшая россыпь на Кольском полуострове // Природа. 2009. №12. С.33—39.
4. Портнов А.М. Сульфидная галька в рудных зонах гидротермальных месторождений — индикатор конвекции растворов // Докл. СССР. 1978. Т.239. №3. С.664—667.
5. Портнов А.М., Моисеев Б.М., Ткачева Т.В. Радон как причина палеодозиметрического парадокса в кварц-пиритовой гальке гидротермального конгломерата // Докл. СССР. 1979. Т.247. №6. С.1482—1485.
6. Портнов А.М. Глубинные конгломераты — месторождения золота, урана, алмазов // Природа. 1980. №7. С.27—33.
7. Sillitoe R.H. Ore-Related Breccias in Volcanoplutonic Arcs // Econom. Geol. 1985. V.80. P.1467—1514.
8. Портнов А.М. Витватерсранд как рудная формация глубинных конгломератов // Изв. ВУЗов. Сер. геолог. 1997. №4. С. 63—67.
9. Шило Н.А. Витватерсранд и проблема рудообразования // Записки геолога. Т.2. С.291—305. М., 2007.
10. Портнов А.М. Кимберлиты — мантийные флюидизиты // Природа. 2012. №12. С.42—48.



# Планета бактерий

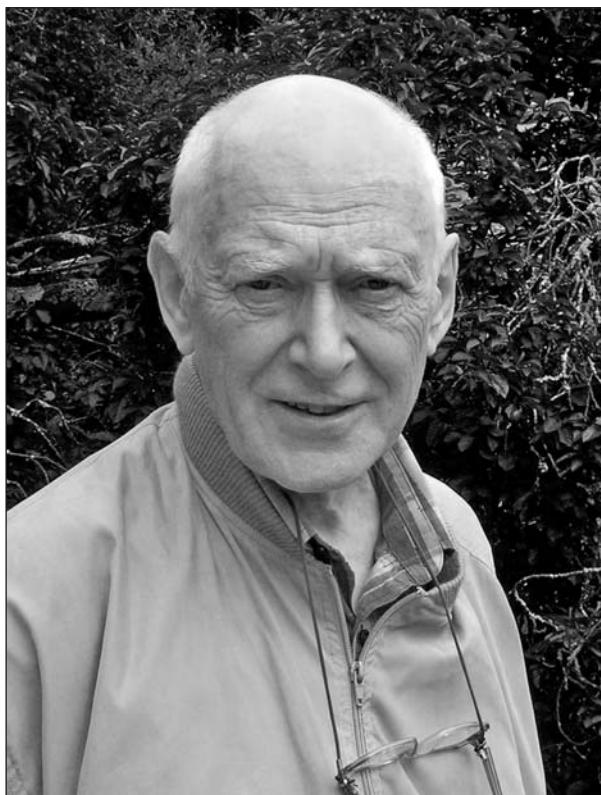
К 80-летию со дня рождения академика Г.А.Заварзина

Более полувека Георгий Александрович Заварзин изучал «планету бактерий» — так определял предмет своей научной деятельности этот страстный охотник за микробами. Крупнейший естествоиспытатель, он не только открывал и описывал новые группы микробов, находил и исследовал их новые местообитания (современные аналоги древней биосферы), но и разрабатывал системный подход к изучению сложных взаимодействий микроорганизмов и их взаимосвязи с окружающей средой.

Изучение микробных сообществ как целостной системы легло в основу созданного им нового научного направления — природоведческой микробиологии. Системный подход позволил ему утвердиться в том, что именно кооперативные бактериальные сообщества создали условия для дальнейшего развития биосферы. Признание ведущей роли микроорганизмов в ее становлении и поддержании, по мнению Заварзина, может изменить приоритеты в мировоззрении естествоиспытателя и поставить микробиологию на центральное место в ряду наук о жизни.

Высочайший научный авторитет Заварзина и нестандартность его подходов влекли к нему не только микробиологов, но и людей смежных дисциплин — геологов, палеонтологов, почвоведов, физиологов растений, биохимиков. Шло взаимное обогащение, и возникали подчас новые дисциплины, как, например, бактериальная палеонтология. Широкий кругозор и эрудиция делали Заварзина незаменимым при решении многих фундаментальных проблем в разрабатываемых научных направлениях. Он был координатором и участником Федеральной научно-технической программы «Глобальные изменения природной среды и климата», программ Президиума РАН «Глобальная эволюция биосферы. Антропогенный вклад» и «Происхождение и эволюция биосферы». По этим направлениям работал и возглавляемый им отдел микробных сообществ в Институте микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН.

Георгий Александрович всегда уделял большое внимание популяризации научных знаний. Много писал сам, в том числе и в наш журнал, в редколлегии которого был с 1982 г. Многие развиваемые им направления нашли отражение на страницах «Природы».



Георгий Александрович Заварзин  
28.01.1933 — 06.09.2011

Георгий Александрович работал до последних дней своей жизни. В 2010 г. он должен был открывать учрежденные Президиумом РАН чтения им.С.Н.Виноградского. Будучи уже не в силах прочесть эту лекцию, Георгий Александрович подготовил ее в виде монографии «Эволюция прокариотной биосферы. Микробы в круговороте жизни. 120 лет спустя». В этой книге в концентрированной форме на основе собственных научных изысканий он определил роль микробных сообществ в становлении и поддержании биосферы.

Сегодня основные направления исследований, инициированные Георгием Александровичем, продолжают его ученики и коллеги. Статьи некоторых из них и составили предлагаемую читателям подборку.

# Новые термофильные прокариоты

Е.А.Бонч-Осмоловская

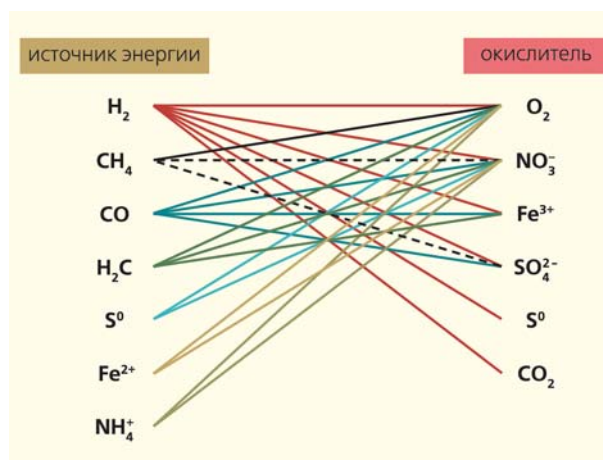
Мир микробов — своего рода живой музей, где представлены чрезвычайно разнообразные типы энергетического обмена (катаболизма), недоступные более сложным организмам, существующим за счет фотосинтеза или окисления органических веществ. Только прокариоты (бактерии и археи) — крайне простые по форме и внутриклеточному строению безъядерные микроорганизмы — способны использовать в качестве источников энергии (доноров электронов) не только органические субстраты, но и неорганические соединения, а в качестве окислителей (акцепторов электронов) помимо кислорода — различные оксиды или соединения с переменной валентностью. И это свойство прокариот наряду со способностью жить в экстремальных условиях — одна из их важнейших отличительных черт.

Г.А.Заварзин, занимавшийся обширными междисциплинарными исследованиями, испытывал особый интерес к микроорганизмам, использующим необычные доноры и акцепторы электронов. Любовь к таким микробам он сохранял всю жизнь сам и привил своим ученикам, а также ученикам учеников — «научным внукам», как он их называл. В 1972 г. вышла книга «Литотрофные микроорганизмы», в которой Георгий Александрович описал всех известных к тому времени микробов, использующие неорганические источники энергии и разнообразные окислители. А спустя два года появилась еще одна его книга — «Фенотипическая систематика бактерий: пространство логических возможностей», актуальная и по сей день. В ней утверждается, что в мире микробов возможны все энергетические процессы, не противоречащие законам термодинамики, хотя в реальности известны пока только некоторые. Действительно,



**Елизавета Александровна Бонч-Осмоловская**, доктор биологических наук, заведующая лабораторией гипертермофильных микробных сообществ и заместитель директора по научной работе Института микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН. Область научных интересов — разнообразие, филогения, метаболизм, экология термофильных прокариот из наземных, морских и подземных термальных местообитаний.

за минувшие 40 лет матрица окислительно-восстановительных реакций, поддерживающих рост микроорганизмов, значительно пополнилась, и в том немалая заслуга и самого Заварзина, и его учеников.



Сочетания субстратов (доноров электронов) и окислителей (акцепторов электронов), используемых микроорганизмами для получения энергии. Пунктирными линиями обозначены процессы, известные пока только в природных сообществах микроорганизмов.

## Термофилы

Наиболее разнообразны по типам катаболизма микроорганизмы, обитающие в горячих источниках вулканического происхождения, где доступ к кислороду, а в большинстве случаев и к органическому веществу, ограничен. Донорами электронов для термофилов (от греч. θερμη — тепло и φιλεω — люблю) служат присутствующие там в изобилии восстановленные неорганические соединения, а окислителями — полностью или частично окисленные производные этих соединений.

О существовании термофилов, для которых высокие температуры среды — оптимальные условия роста, известно с начала XX в. Тогда считалось, что обитают они в основном в местах, связанных с деятельностью человека, — таких как компост или угольные отвалы, где повышение температуры происходит за счет саморазогревания. Известные тогда термофилы росли в основном за счет окисления органического вещества кислородом воздуха при температурах, не превышающих 50–60°C. Однако в конце 1970-х годов американский микробиолог Т.Брок обнаружил в горячих источниках Йеллоустонского национального парка микробов, способных к росту при более высоких температурах и с более разнообразным метаболизмом, чем считалось ранее. Естественно, интерес ученых к термофилам резко возрос.

Примерно в то же время и в нашем институте, в лаборатории, которой руководил Заварзин, начались исследования термофильных прокариот в природных местообитаниях, а именно в кальдере вулкана Узон на Камчатке. Главным и постоянным проводником в мир горячих источников вулканического происхождения для нас стал Г.А.Карпов, сотрудник Института вулканологии АН СССР.

Кальдера Узон представляет собой чашу диаметром 10 км, окаймленную горами — остатками обрушившегося кратера вулкана. Там протекают ручьи, есть озера, болота, заросли кедрового стланика, поляны, заросшие голубикой или папоротником. Но главная достопримечательность — так называемые термальные поля, расположенные по линии разлома и объединяющие бесчисленное количество горячих источников, грязевых котлов, газопаровых выходов. Отличаются они и по температуре воды (от чуть теплой до кипящей; точка кипения на этой высоте — 96°C), и по кислотности — от нейтральных зна-



Оранжевое термальное поле в кальдере Узон на Камчатке, где велись микробиологические исследования.

Фото И.В.Кубланова

чений pH до очень низких (2 и ниже). В некоторых источниках микробная жизнь заметна даже невооруженным глазом. Там можно увидеть так называемые цианобактериальные маты — сообщества фототрофных прокариот, а также «стримеров», растущих в протоке и использующих растворенные в воде неорганические субстраты (в первую очередь сероводород). Другие источники кажутся безжизненными, однако в их воде и осадке присутствуют миллионы микробных клеток, в которых протекают разнообразные химические реакции.

В начале 1980-х годов Георгия Александровича интересовала роль микроорганизмов в формировании современной атмосферы. Для выяснения этого были поставлены простые и изящные опыты: термофильный цианобактериальный мат помещали в смесь газов, имитирующую вулканические эксгаляции и, соответственно, бескислородную атмосферу эпохи докембрия. Через некоторое время она преобразовывалась в современную атмосферу, и таким образом была доказана роль цианобактерий в ее становлении. Эти работы легли в основу книги «Бактерии и состав атмосферы» (1984), которая, несмотря на весьма скромное издание в популярной серии, сразу заинтересовала многих микробиологов и актуальна до сих пор.

Одновременно полным ходом велись исследования метаболического разнообразия термофильных прокариот. В результате была выделена растущая за счет окисления водорода кислородом воздуха бактерия, которая, как выяснилось позд-

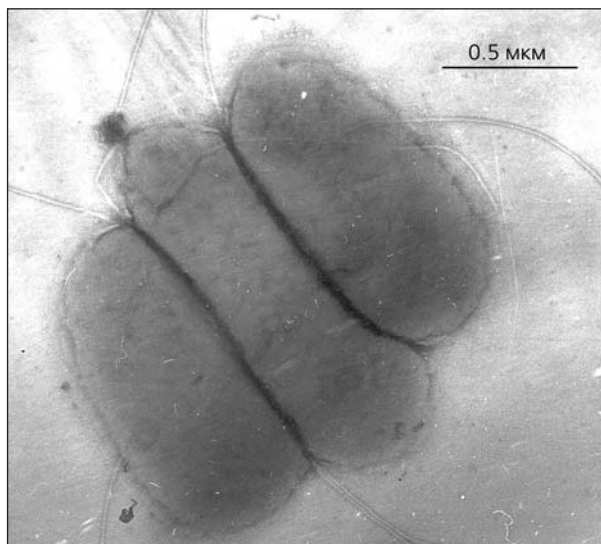


нее, оказалась первым представителем одной из древнейших групп — *Aquificales*. Кроме того, были выделены и описаны термофильные метаногены, анаэробно использующие водород и восстанавливающие углекислый газ в метан, а также гипертермофильные археи, способные расти при 90°C и выше. В 1996 г. по настоянию Заварзина была создана самостоятельная лаборатория гипертермофильных микробных сообществ, ядром которой стала группа ученых, занимающихся разнообразием термофилов.

Сегодня в нашей лаборатории работает более 20 сотрудников, аспирантов и студентов. Ежегодно отправляются экспедиции в места обитания термофилов: как и прежде, в кальдере Узон, а также к другим наземным горячим источникам — в долину р. Баргузин в окрестностях Байкала, на о. Кунашир. Мы изучаем микробные сообщества морских мелководных гидротерм (в районе Курильских о-вов) и глубоководных (в Атлантическом и Тихом океанах), кроме того, высокотемпературную подземную биосферу в нефтяных скважинах Западной Сибири и золотодобывающих шахтах Южной Африки. По-прежнему основное внимание уделяется микробному разнообразию, однако для его изучения теперь применяются не только культуральные, но и молекулярно-биологические методы, позволяющие идентифицировать новые микроорганизмы непосредственно в природных экосистемах. Для изучения метаболизма новых изолятов теперь анализируются их полные геномы, характеризуются активности новых ферментов. И, замечу, в основе нескольких наиболее интересных направлений исследований лежат идеи, когда-то щедро подаренные нам Георгием Александровичем. О них и хочется рассказать.

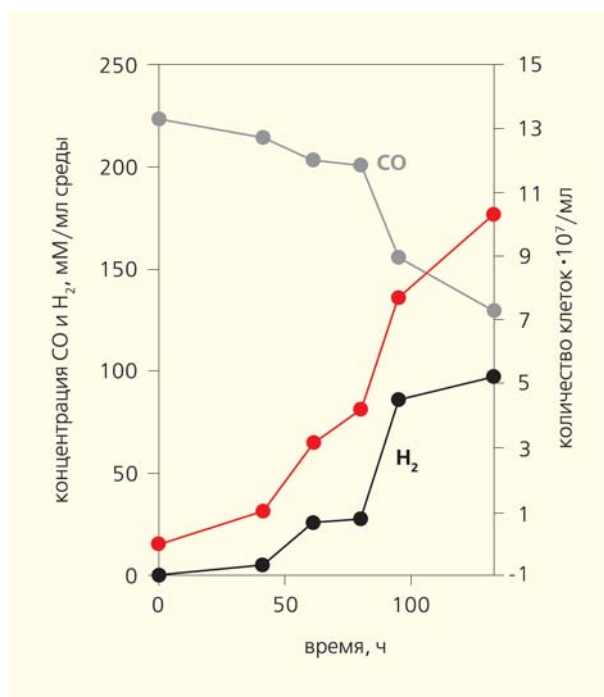
### CO и формиат — субстраты термофилов

Для высших организмов угарный газ, или монооксид углерода (CO), — ядовитое вещество, а для микробов — энергетический субстрат. Они живут и размножаются за счет окисления CO в процессе аэробного дыхания, что впервые исследовали Г.А.Заварзин и А.Н.Ножевникова еще в начале 1970-х годов. Микроорганизмы могут использовать монооксид углерода и в бескислородных условиях, и в таком случае продуктами жизнедеятельности становятся метан или уксусная кислота. В начале 90-х годов В.А.Светличный под руководством Георгия Александровича выделил из осадков горячих источников о.Кунашир первую термофильную бактерию, способную расти на CO, анаэробно окисляя его в реакции с водой и выделяя при этом углекислоту и водород:  $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ . Микроорганизм был назван *Carboxydothemus hydrogenoformans*, а сам процесс — гидрогеногенным окислением CO, или гидрогеногенной карбоксидотрофией.



*Carboxydothemus hydrogenoformans* — первая термофильная бактерия, растущая за счет анаэробного окисления CO с образованием H<sub>2</sub> из воды. Бактерия выделена В.А.Светличным и Т.Г.Соколовой.

Ранее такие способности были выявлены только у одного микроорганизма — фотосинтезирующей мезофильной бактерии *Rhodospirillum rubrum*, которая за счет этой реакции может жить в темноте. Однако, как оказалось, гидрогеногенное окисление CO более распространено среди термофи-



Рост термофильных микроорганизмов (красная кривая), потребляющих CO и образующих H<sub>2</sub> (по Д.А.Кожевниковой и Т.Г.Соколовой).

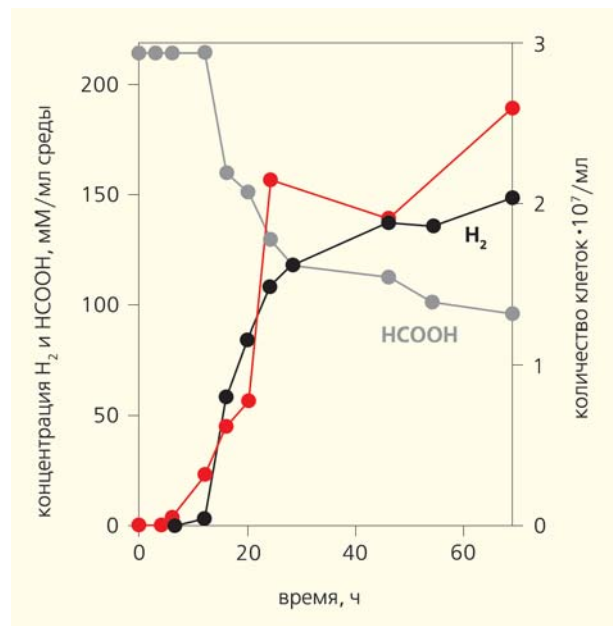


лов, что вполне объяснимо — монооксид углерода практически повсеместно присутствует в вулканических газах. Термофилы — в основном рано обособившиеся группы прокариот — могли сохранить этот энергетический механизм с древних времен, когда концентрация монооксида углерода в атмосфере была значительно выше, чем сейчас.

Сотрудники нашей лаборатории описали множество умеренно и экстремально термофильных бактерий (оптимумы 50–60°C и 70–75°C соответственно), способных к гидрогеногенной карбоксидотрофии. Относятся они к самым разным по происхождению группам; большинство представляет новые роды, одна — новый класс, умеренно и экстремально термофильных бактерий [1]. Кроме того, гидрогеногенно окислять CO могут и гипертермофильные археи. Первый такой организм — *Thermococcus* AM4 — был выделен из глубоководных гидротерм Восточно-Тихоокеанского поднятия. Он рос при 85°C и, как ранее выделенные бактерии, в атмосфере 100% CO. Однако в природных условиях концентрация CO гораздо ниже, и можно было предположить, что существуют микроорганизмы, использующие монооксид углерода в энергетическом метаболизме, но чувствительные к его высокой концентрации. Так оно и оказалось: снижение концентрации CO в газовой фазе до 45% позволило выделить из горячего источника Камчатки (вулкан Мутновский) еще одну гипертермофильную карбоксидотрофную архею — *Thermofilum carboxydotropbus*, относящуюся к другой эволюционной ветви.

Термофильные карбоксидотрофы различаются не только по происхождению и температуре роста. Среди них есть автотрофы, которым для размножения нужны лишь монооксид углерода, вода и небольшое количество минеральных солей, и такие организмы, которые, потребляя CO как энергетический субстрат, все-таки нуждаются в органическом веществе для построения клеток и растут лишь в присутствии низких концентраций дрожжевого экстракта. Одни используют только CO, образуя водород из воды, другие способны к сбраживанию органических субстратов или анаэробному дыханию, т.е. могут окислять CO, одновременно восстанавливая сульфат, железо, селенат, серу.

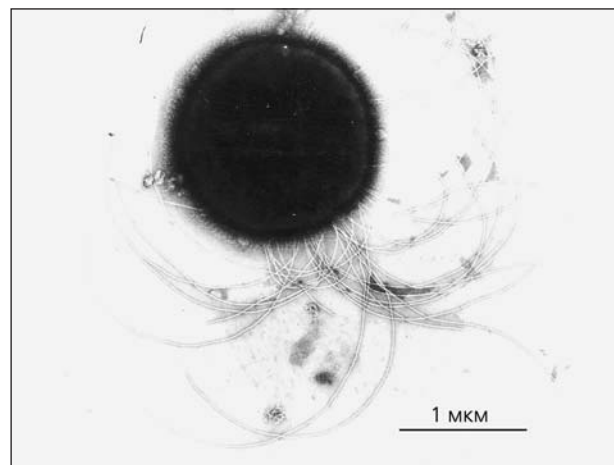
Разнообразие гидрогеногенных карбоксидотрофов вызвало интерес к генетическим детерминантам этого процесса, для чего потребовался анализ доступных полных геномов таких организмов. В результате был найден единый генетический аппарат: несколько генов, из которых два оказались важнейшими — ген CO-дегидрогеназы и ген конвертирующей энергию гидрогеназы. Во всех случаях оба гена присутствуют в виде единого кластера, однако их взаимное расположение может различаться: один тип характерен для большинства бактерий, другой найден у архей и лишь у одной бактерии, выделенной из глубоководных гидротерм.



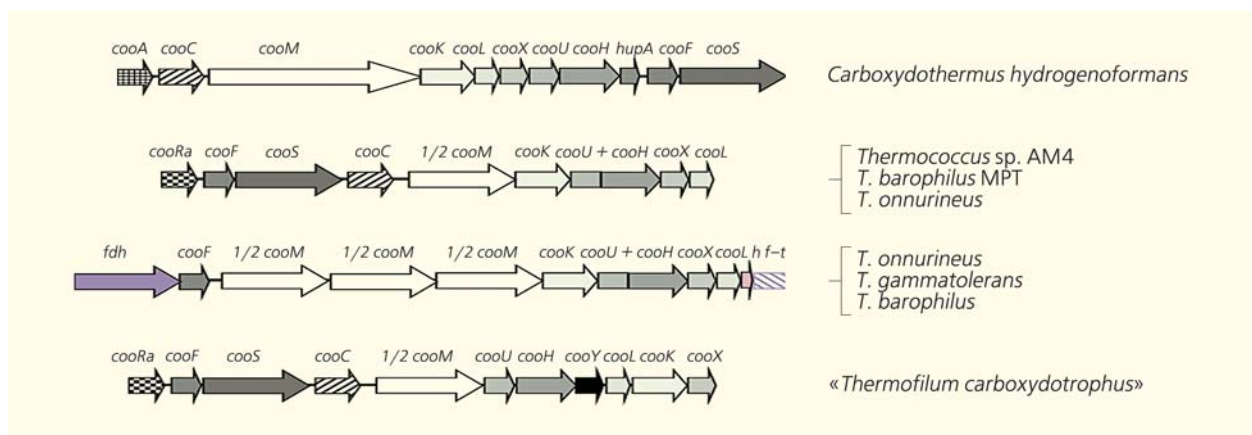
Рост гипертермофильной археи рода *Thermococcus*, потребляющей формиат и образующей водород (по Д.А.Кожевниковой и Т.Г.Соколовой).

Таким образом, можно предположить, что гидрогеногенное окисление CO, один из простейших способов получения энергии, требующий участия небольшого числа генов, — древнейший энергетический процесс. Свидетельство его раннего происхождения — распространенность именно среди термофилов, которым для жизни необходимы CO и высокие температуры, а и то и другое характерно для первичной биосферы Земли.

Изучение геномов гипертермофильных архей рода *Thermococcus* выявило другой кластер, в котором конвертирующая энергию гидрогеназа со-



*Thermococcus* AM4 — первая гипертермофильная архея, анаэробно окисляющая CO с образованием H<sub>2</sub> из воды. Выделен Т.Г.Соколовой.



Генные кластеры, обуславливающие способность к росту за счет анаэробного окисления CO или формиата с образованием водорода и включающие CO- (*cooS*) или формиат- (*fdh*) дегидрогеназу (по А.В.Лебединскому).

читалась не с CO-, а с формиатдегидрогеназой. Всегда считалось, что энергетический выход реакции образования водорода из муравьиной кислоты, или формиата, ( $\text{HCOOH} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$ ) недостаточен, чтобы поддерживать рост микроорганизмов. Однако существование кластера генов, аналогичного уже известному для гидрогеногенных карбоксидотрофов, говорило об обратном. И действительно, выяснилось, что и выделенный корейскими учеными *Thermococcus onnurineus*, и наши новые изоляты, относящиеся к тому же роду, а также некоторые коллекционные штаммы способны расти за счет разложения формиата на водород и углекислоту [2]. Энергетический выход реакции в конкретных экспериментальных условиях оказался достаточным для обеспечения роста микроорганизмов. Интересно, что все организмы, способные к гидрогеногенному окислению формиата, были выделены из глубоководных гидротерм, а именно там возможно абиогенное образование восстановленных органических соединений, включая формиат, в результате серпентинизации — реакции минералов с водой.

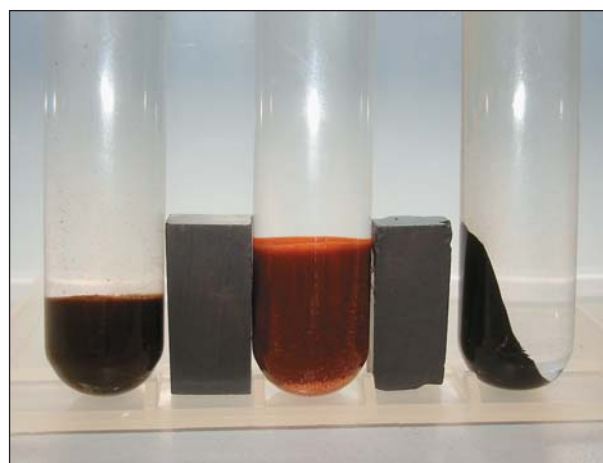
Таким образом, термофильные прокариоты способны использовать энергию одноуглеродных соединений в простейших процессах, причем эти энергетические субстраты имеют абиогенное происхождение, а окислитель не требуется вообще. Такие процессы могли быть первичными окислительно-восстановительными реакциями, «запускающими» прокариотные экосистемы древней Земли.

### Железоредукция

Среди окислителей, используемых микроорганизмами при анаэробном дыхании, есть и оксид железа. Диссимиляционная природа этого процесса (т.е. участие в энергетическом метаболизме клетки) была выявлена в лаборатории Заварзина.

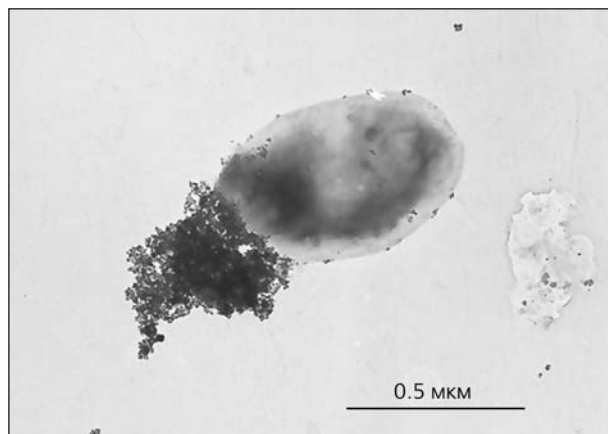
В 1970-х годах В.В.Балашова выделила первую литотрофную бактерию, анаэробно окисляющую молекулярный водород за счет восстановления трехвалентного железа. В 1995 г. А.И.Слободкин и Г.А.Заварзин получили первую ассоциацию термофильных микроорганизмов, диссимиляционно восстанавливающую железо с образованием магнетита. В последующие годы удалось не только обнаружить эту способность у многих уже известных термофильных архей и бактерий, но и выделить новые микроорганизмы, обладающие таким свойством. Выяснилось, что термофильные железовосстанавливающие прокариоты широко распространены во всех известных термальных местобитаниях [3].

Поскольку оксид железа, в отличие от большинства других акцепторов электронов, нерастворим в нейтральной среде, микроорганизмы должны обладать специальными механизмами передачи электронов из клетки во внешнюю среду.



Образование магнетита культурой термофильной железовосстанавливающей бактерии.

Фото А.И.Слободкина



Клетка железовосстанавливающей гипертермофильной археи *Geoglobus acetivorans* с кристаллами образовавшегося магнетита. Выделен Г.Б.Слободкиной.

Эти механизмы активно изучали американские исследователи на примере мезофильных бактерий родов *Geobacter* и *Shewanella*. В качестве термофильной модели мы выбрали железовосстанавливающую бактерию *Carboxydotherrmus ferrireducens*, которая отличается от мезофильных аналогов еще и иным строением клеточной оболочки (относится к грамположительным бактериям). *C. ferrireducens* может восстанавливать железо [ $\text{Fe(III)} + e \rightarrow \text{Fe(II)}$ ] и образовывать магнетит за счет окисления как неорганических субстратов (водорода, CO), так и органических (ацетата и др.).

Интересно, что у *C. ferrireducens* несколько вариантов взаимодействия с нерастворимым ферригидритом ( $\text{FeOOH} \cdot 0.4\text{H}_2\text{O}$ ) [4]. Например, при прямом контакте с бактериальной клеткой ферригидрит активно восстанавливался, а если его заключали в гелевые зерна альгината, происходило значительное снижение скорости роста, урожая клеток и количества образуемого культурой Fe(II). Однако добавление белка сидерофора может частично вернуть утраченную активность и стимулировать диссимиляционное восстановление Fe(III) даже в отсутствие свободного доступа клеток к ферригидриту. Механизм стимуляции заключается в многократном использовании сидерофора в качестве челночного медиатора, переносящего ион  $\text{Fe}^{3+}$ .

Другие, не менее интересные результаты получены при анализе генома гипертермофильной археи *Geoglobus acetivorans*, выделенной из глубоководных гидротерм [5]. У этой археи обнаружены гены, кодирующие 10 ферментов (терминальных редуктаз — мембраносвязанных мультигемных цитохромов c), которые взаимодействуют с нерастворимым оксидом железа. Наличие этих ферментов у *G.acetivorans* было подтверждено спектрофотометрически в общей фракции мембранных белков организма. Так впервые было открыто, что среди архей есть организмы, способные восстанавливать оксид Fe(III) с участием цитохро-

мов. В геноме *G.acetivorans* обнаружены также гены биосинтеза клеточных выростов, с помощью которых клетка взаимодействует с нерастворимыми соединениями железа. Предположительно это пили, выявленные ранее с помощью электронной микроскопии.

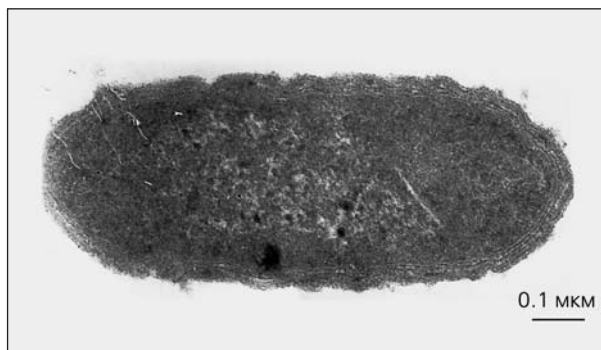
Способность к восстановлению железа была обнаружена и у нового микроорганизма *Melioribacter roseus*, выделенного из микробного мата, развивающегося на изливе нефтеразведывательной скважины в Томской обл. Этот организм представляет новую эволюционную линию бактерий — *Ignavibacteria* [6]. В результате анализа его полного генома выявлены гены, кодирующие компоненты цепи переносчиков, осуществляющей перенос электронов на окисное железо. Примечательно, что *M.roseus* способен также гидролизовать разнообразные биополимеры, в том числе целлюлозу. Таким образом, был опровергнут существовавший постулат, согласно которому процесс анаэробного разложения органического вещества требует присутствия сложного сообщества микроорганизмов, в котором одни компоненты производят гидролиз полимеров, другие сбрасывают образовавшиеся мономеры, третьи доокисляют продукты брожения. В случае с *M.roseus* полную минерализацию сложных органических субстратов осуществляет один организм. Это свойство может найти практическое применение — например, при производстве «микробного» электричества из органических отходов.

## Сероредукция

Соединения серы — одни из наиболее распространенных доноров и акцепторов электронов в мире прокариот. Наиболее изучена бактериальная сульфатредукция, в первую очередь благодаря огромному биогеохимическому значению этого процесса. Однако для микробных сообществ термальных местобитаний очень важны реакции, связанные с окислением и восстановлением частично окисленных соединений — элементной серы и тиосульфата. Первая термофильная бактерия, восстанавливающая серу в процессе анаэробного роста, была выделена из цианобактериального мата кальдеры Узон в 1990 г. [7]. Заварзин, который руководил исследованиями, придумал для этой бактерии красивое родовое название — *Desulfurella*; впоследствии для этой группы был создан отдельный порядок *Desulfurellales*.

В качестве источника энергии *Desulfurella* использует молекулярный водород, восстанавливая элементную серу в сероводород ( $\text{H}_2 + \text{S}^0 \rightarrow \text{H}_2\text{S}$ ); при этом углекислота служит источником углерода, и бактерия, таким образом, является первичным продуцентом органического вещества в гидротермах. Она же может разлагать разнообразные органические соединения, в том числе летучие





*Desulfurella acetivorans* — первая термофильная бактерия, восстанавливающая элементарную серу: целая клетка (слева) и ультратонкий срез.

жирные кислоты (основные промежуточные продукты брожения), завершая минерализацию органического вещества. Численность представителей рода *Desulfurella* в аноксигенных цианобактериальных матах — до 10 млн клеток в 1 см<sup>3</sup>. Источник, из которого была выделена первая *Desulfurella* — *D. acetivorans*, назван грифоном Заварзина, и микробные сообщества оттуда по сей день служат объектами разнообразных микробиологических и молекулярно-биологических исследований.

Впоследствии из горячих источников кальдеры Узон были выделены новые сероредуцирующие бактерии: *Ammonifex thiophilus* и *Caldimicrobium rimaе* [8, 9]. Первый из этих микроорганизмов может еще и восстанавливать сульфаты. Последовательности ключевых генов сульфатредукции, принадлежащие *A. thiophilus*, были идентифицированы в пробах из ряда гидротерм кальдеры Узон. Вто-

рой изолят, *C. rimaе*, по результатам пиросеквенирования филогенетических маркеров из тотальной природной ДНК оказался одним из доминирующих организмов в самом горячем (с температурой 96°C) источнике кальдеры Узон — котле Бурлящем. Как и *D. acetivorans*, оба эти микроорганизма и выделенная недавно *Brockia lithotrophica* [10] способны к синтезу органического вещества за счет использования водорода (источника энергии) и элементарной серы (окислителя).

Недавно была открыта новая метаболическая группа: из глубоководных гидротерм бассейна Лау в Тихом океане выделена первая термофильная бактерия, растущая за счет так называемого диспропорционирования серы, при котором один атом серы окисляется до тиосульфата, а три — восстанавливаются в сероводород:  $4S^0 + 4H_2O \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-} + 3H_2S$  [11]. Процесс, который иногда называют еще дисмутацией или неорганическим

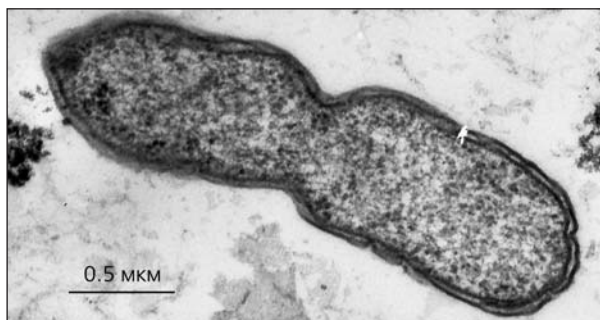
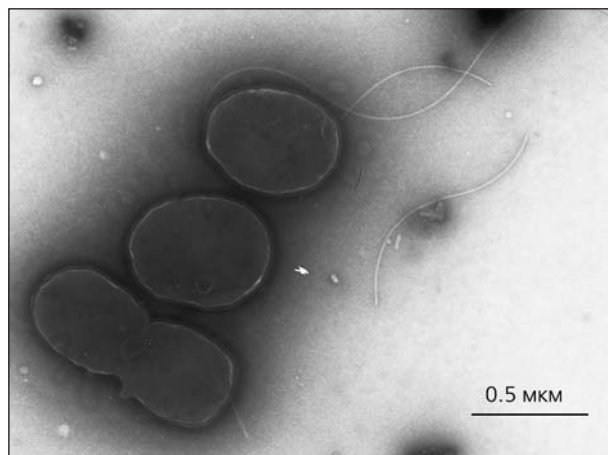
брожением, известен давно, но только для мезофильных бактерий. Новый термофильный организм — *Thermosulfurimonas dismutans* — развивается на минеральной среде в присутствии лишь элементарной серы, используя CO<sub>2</sub> в качестве источника углерода. Но есть и обязательное условие — наличие в среде железа, которое связывает образующийся сульфид, поддерживая его низкую концентрацию. Также *T. dismutans* может осуществлять диспропорционирование тиосульфата и сульфита. Есть основания полагать, что микроорганизмы с подобным метаболизмом широко распространены не только в морских, но и в наземных гидротермах, в том числе и в кальдере Узон, и относятся к самым разнообразным группам прокариот. Это



Грифон Заварзина в кальдере Узон, Камчатка.

Фото И.В.Кубланова





*Thermosulfurimonas dismutans* — первая термофильная бактерия, растущая за счет диспропорционирования элементарной серы: целые клетки (слева) и ультратонкий срез. Бактерия выделена А.И.Слободкиным.

согласуется с доступностью частично окисленных соединений серы в вулканических местообитаниях и делает диспропорционирующие их микроорганизмы вероятными кандидатами на роль первичных продуцентов органического вещества в микробных сообществах гидротерм.

\* \* \*

В XXI в. микробиология получила мощнейшие орудия исследований — геномное и метагеномное секвенирование, возможность детекции пред-

ставителей исследуемых физиологических групп по соответствующим ключевым генам, прямое определение доли исследуемых микроорганизмов в сообществе с помощью количественных молекулярно-биологических методов. Но идеи нашего учителя Георгия Александровича Заварзина при этом не только не устаревают, но и получают новые подтверждения и развитие. И мы все бесконечно благодарны ему за открывшийся нам мир метаболического разнообразия прокариот и привитую любовь к постоянному поиску нового. ■

## Литература

1. Sokolova T.G., Henstra A.-M., Sipma J. et al. Diversity and ecophysiological features of thermophilic carboxydrotrophic anaerobes // FEMS Microbiol. Ecol. 2009. V.68. P.131—141.
2. Kim Y.J., Lee H.S., Kim E.S. et al. Formate-driven growth coupled with H<sub>2</sub> production // Nature. 2010. V.467. P.352—355.
3. Слободкин А.И. Термофильная микробная металлоредукция // Микробиология. 2005. Т.6. С.581—595.
4. Gavrillov S.N., Lloyd J.R., Kostrikina N.A. et al. Fe(III) oxide reduction by a Gram-positive thermophile: physiological mechanisms for dissimilatory reduction of poorly crystalline Fe(III) oxide by a thermophilic Gram-positive bacterium *Carboxydotherrmus ferrireducens* // Geomicrobiol. J. 2012. V.29. P.804—819.
5. Slobodkina G.B., Kolganova T. V., Querellou J et al. *Geoglobus acetivorans* sp. nov., an iron(III)-reducing archaeon from a deep-sea hydrothermal vent Int. // J. Syst. Evol. Microbiol. 2009. V.59. P.2880—2883.
6. Podosokorskaya O.A., Kadnikov V.A., Gavrillov S.N. et al. Characterization of *Melioribacter roseus* gen. nov., sp. nov., a novel facultatively anaerobic thermophilic cellulolytic bacterium from the class Ignavibacteria, and a proposal of a novel bacterial phylum Ignavibacteriae // Environmental Microbiol. 9 Jan. 2013 (DOI: 10.1111/1462—2920.12067).
7. Bonch-Osmolovskaya E.A., Sokolova T.G., Kostrikina N.A., Zavarzin G.A. *Desulfurella acetivorans* gen. nov., sp. nov., a new thermophilic sulfur-reducing bacterium // Arch. Microbiol. 1990. V.153. P.151—155.
8. Miroshnicbenko M.L., Tourova T.P., Kolganova T.V. et al. *Ammonifex thiophilus* sp. nov., a novel hyperthermophilic anaerobic bacterium from Kamchatka hot spring // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2008. V.58. P.2935—2938.
9. Miroshnicbenko M.L., Lebedinsky A.V., Chernykh N.A. et al. *Caldimicrobium rimae* gen. nov., sp. nov., a novel extremely thermophilic facultatively lithoautotrophic anaerobic bacterium from the Uzon Caldera, Kamchatka // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2009. V.59. P.1040—1044.
10. Perevalova A.A., Kublanov I.V., Baslerov R.V., Bonch-Osmolovskaya E.A. *Brockia lithotrophica* gen. nov., sp. nov., a novel anaerobic thermophilic bacterium from a terrestrial hot spring // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2013. V.63. P.479—483.
11. Slobodkin A.I., Reysenbach A.-L., Slobodkina G.B. et al. *Thermosulfurimonas dismutans* gen. nov., sp. nov. a novel extremely thermophilic sulfur-disproportionating bacterium from a deep-sea hydrothermal vent // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2012. V. 62. P. 2565—2571.

# Ацидобактерии — неизвестные доминанты наземных экосистем

*..Наибольшее значение имеют наиболее массовые формы, которые в силу их «банальности» остаются на обочине внимания, психологически концентрирующегося на экстраординарном, сенсационном.*

С.Н.Дедыш, Ю.М.Серкебаева

Г.А.Заварзин

Нельзя не согласиться со словами, приведенными в эпиграфе к статье. В самом деле, наше внимание легко привлекает что-то необычное, не укладывающееся в рамки повседневности. Не составляют исключения и естествоиспытатели, старающиеся проникнуть в наиболее отдаленные уголки нашей планеты в поисках экзотических экосистем, неизвестных представителей флоры и фауны, а также микроорганизмов, которым посвящена настоящая статья. Известно, что микробы живут везде, даже там, где в силу физико-химических условий жизнь других организмов невозможна. Бытует мнение, что именно в таких экстремальных местообитаниях больше всего неизвестных микроорганизмов, и в поисках нового надо погружаться на дно океана, вскрывать льды Антарктиды или отправляться в долины вулканов и гейзеров.

Это неверно, далеко ходить не надо — достаточно наклониться и взять горсть земли из-под ног. В нескольких граммах лежащей на вашей ладони почвы обитает не меньше загадочных и неизвестных микроорганизмов, чем в образце, полученном из какого-либо экзотического местообитания. Установить этот поразительный факт удалось еще в начале 90-х



**Светлана Николаевна Дедыш**, доктор биологических наук, заведующая лабораторией микробиологии болотных экосистем Института микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН. Область научных интересов — микробное разнообразие в северных болотных экосистемах, деструкция биополимеров в болотах, а также функции малоизученных групп бактерий.



**Юлия Муратовна Серкебаева**, аспирант той же лаборатории. Занимается изучением молекулярной экологии микроорганизмов.

годов XX в., когда для оценки микробного разнообразия стали использовать молекулярные методы. В 1992 г. при изучении микробов в почве впервые применили экстракцию тотальной ДНК и анализ последовательностей генов 16S рРНК [1]. Оказалось, что большинство прочитанных фрагментов ДНК почвенных бактерий обнаруживают лишь очень отдаленное сходство с таковыми у известных микроорганизмов, т.е. принадлежат бактериям новых, неизвестных групп.

Одна из таких групп почвенных бактерий оказалась самой многочисленной. К концу 90-х годов в ней насчитывались уже несколько сотен расшифрованных нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК. Эти бактерии были обнаружены не только в почвах, но и в осадках пресных водоемов, в горячих источниках, шахтных водах, торфяных болотах и на скальных микробиоценозах. В 1997 г.

эта быстрорастущая группа получила статус новой филы в домене Bacteria и была названа Acidobacteria [2], созвучно единственному известному на тот момент представителю — ацидофильной аэробной бактерии *Acidobacterium capsulatum*. Ее выделили японские микробиологи из кислых дренажных вод рудных отвалов [3]. Означает ли такое название, что все виды этой группы — ацидофилы? Нет, ацидобактерии весьма разнообразны по физиологическим характеристикам и живут в различных местообитаниях, однако наиболее многочисленны в наземных экосистемах, и в частности в почвах.

### Ацидобактерии — типичные обитатели почв

Тот факт, что Acidobacteria — одна из типичных и численно доминирующих групп почвенных бактерий, пока еще не вошел в учебники. Объясняется это тем, что классическими методами посева, до недавнего времени традиционно использовавшимися для изучения микробного населения почвы, обнаружить ацидобактерии нельзя. Они растут гораздо медленнее, чем хорошо знакомые микробиологам почвенные псевдомонады, бациллы, стрептомицеты и многие другие микроорганизмы. Кроме того, на подавляющем большинстве рутинных питательных сред ацидобактерии и вовсе не могут развиваться. Именно поэтому они так долго оставались неизвестными. Однако с введением в практику молекулярных методов оценки микробного разнообразия стало ясно, что ацидобактерии не только присутствуют во всех без исключения почвах, но и в ряде случаев составляют доминирующую группу.

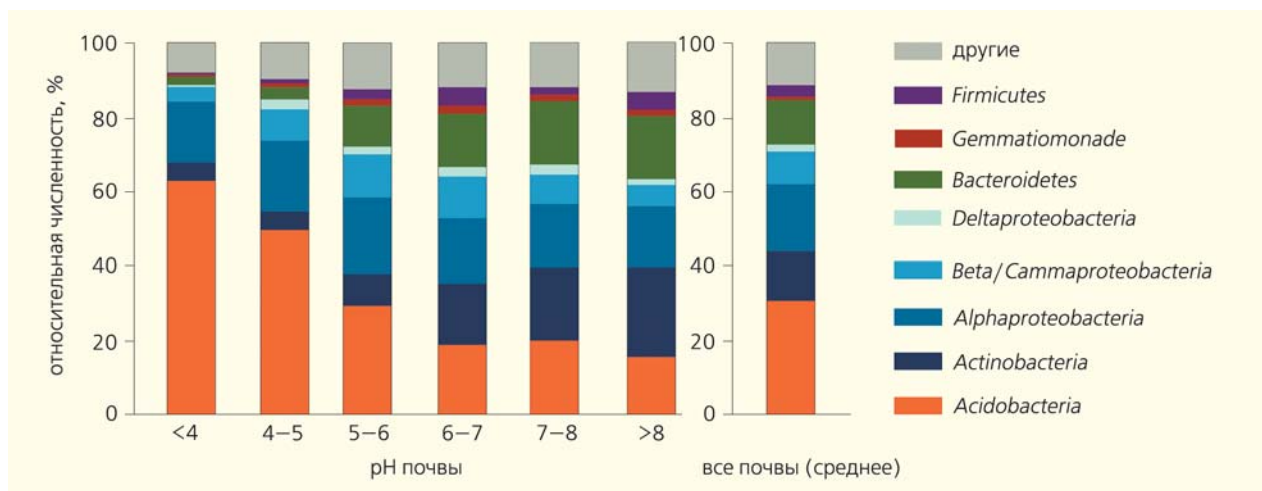
Особенно ярко это было продемонстрировано с помощью одного из современных и точных мето-

дов оценки микробного разнообразия — пиросеквенирования\* рибосомальных генов — своеобразных молекулярных «паспортов» микроорганизмов.

Этот метод позволяет считывать информацию с сотен тысяч микробных «паспортов», т.е. фактически делать перепись микробного населения исследуемого образца. Таким способом группа американских микробиологов провела масштабный анализ бактериального населения 88 почв из различных географических зон США. В результате выяснилось, что на долю ацидобактерий приходится от 15 до 60% всех полученных из образцов последовательностей генов 16S рРНК [4]. Наиболее многочисленны ацидобактерии были в кислых почвах (рН менее 5), тогда как в нейтральных и слабощелочных численное преимущество переходило к другим группам прокариот, например к актинобактериям.

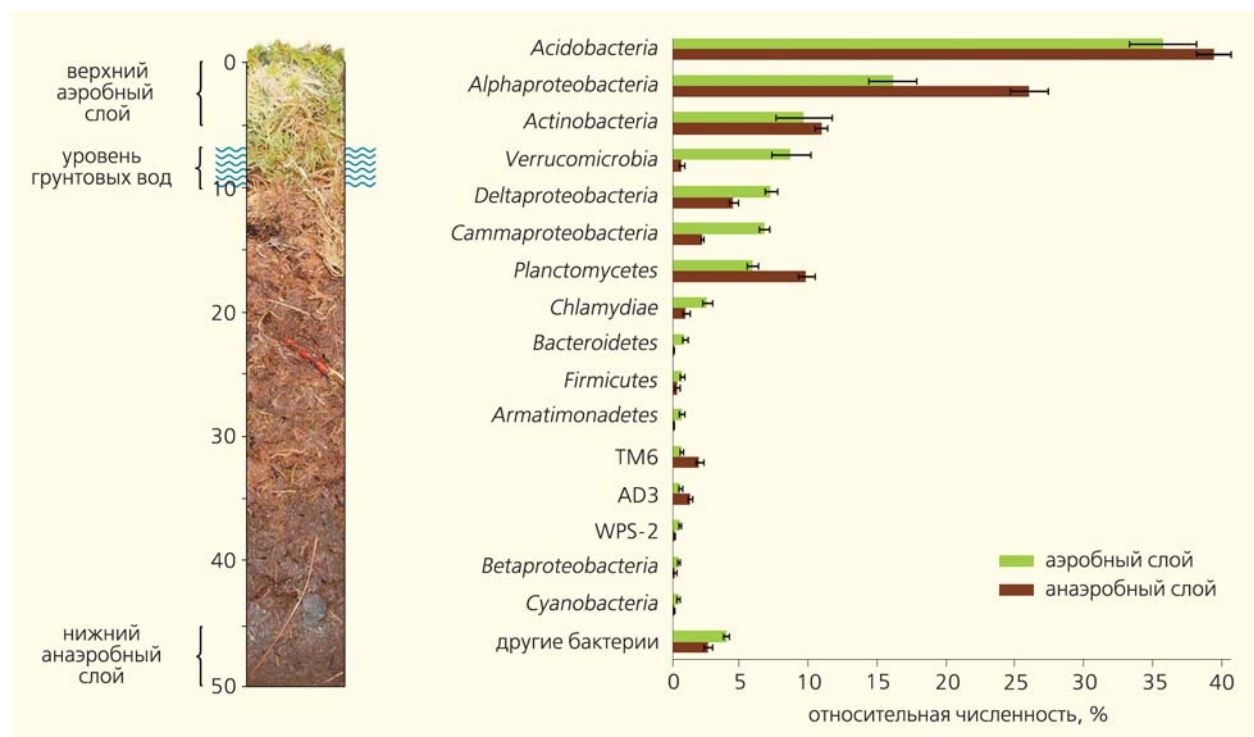
Много ли в России кислых почв? Ответ, неочевидный для неспециалиста, — да. На самом деле таких почв (с рН менее 6) в нашей стране большинство; преимущественно это почвы болотных экосистем (рН от 3.5 до 5) [5]. Их микробные сообщества и стали в нашей лаборатории главным объектом исследований. Мы применили метод пиросеквенирования генов 16S рРНК для изучения бактериального разнообразия в торфе кислото сфагнового болота, типичного для севера России [6]. Самой многочисленной группой болотного микробного сообщества оказались ацидобактерии: на их долю в верхнем, аэробном, слое залежи приходилось около 35% всех проанализированных фрагментов ДНК и около 39% — в анаэробном, затопленном водой пласте торфа на глу-

\* Пиросеквенирование — метод определения последовательности нуклеотидов в ДНК путем синтеза комплементарной цепи, когда присоединение каждого нуклеотида сопровождается регистрацией высвобождающегося пирофосфата.

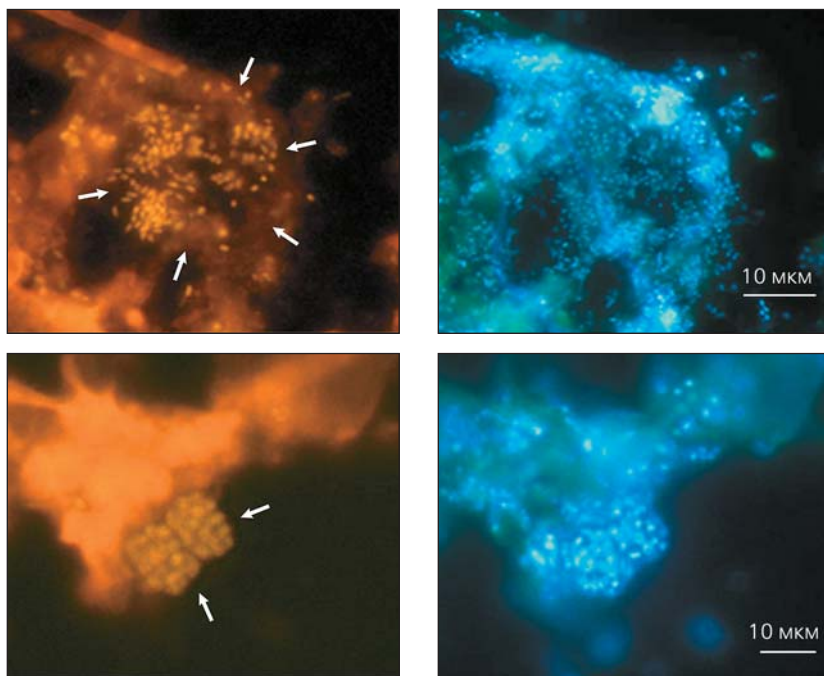


Соотношение числа нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК филогенетических групп бактерий по данным молекулярного анализа микробного разнообразия почв с различными значениями рН [4].





Состав микробных сообществ в торфе сфагнового болота по данным пиросеквенирования генов 16S рРНК [6]. Слева — профиль болота и зоны отбора образцов (отмечены фигурными скобками). Справа — соотношение числа нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК различных филогенетических групп бактерий в аэробном и анаэробном слоях сфагнового болота.



Микрофотографии клеток ацидобактерий в сфагновом торфе. Слева — визуализация бактерий с помощью метода FISH (гибридизация с флуоресцентно-меченым зондом HoAc-1402, стрелками показаны связавшиеся с ним клетки); справа — окраска всех присутствующих в торфе клеток ДНК-специфичным красителем ДАФИ. Здесь и далее фото авторов

бине 0.5 м. Иными словами, ацидобактерии были доминантами бактериального сообщества как в аэробной, так и в анаэробной части профиля болота.

Чтобы увидеть клетки ацидобактерий непосредственно в торфе, мы воспользовались другим молекулярным методом — гибридизацией *in situ* с флуоресцентно-мечеными олигонуклеотидными зондами (метод FISH; fluorescent *in situ* hybridization). Зонд HoAc-1402, который специфически связывается с клетками ацидобактерий, позволил наблюдать компактные микроколонии или диффузные скопления этих бактерий на частицах полуразложившегося растительного материала. Судя по выявленным зондом клеткам, численность ацидобактерий в болотах достаточно высока — достигает десятков миллионов клеток в грамме торфа [7]. Почему же эта группа так плохо изучена и почему доступно так мало культур этих бактерий?



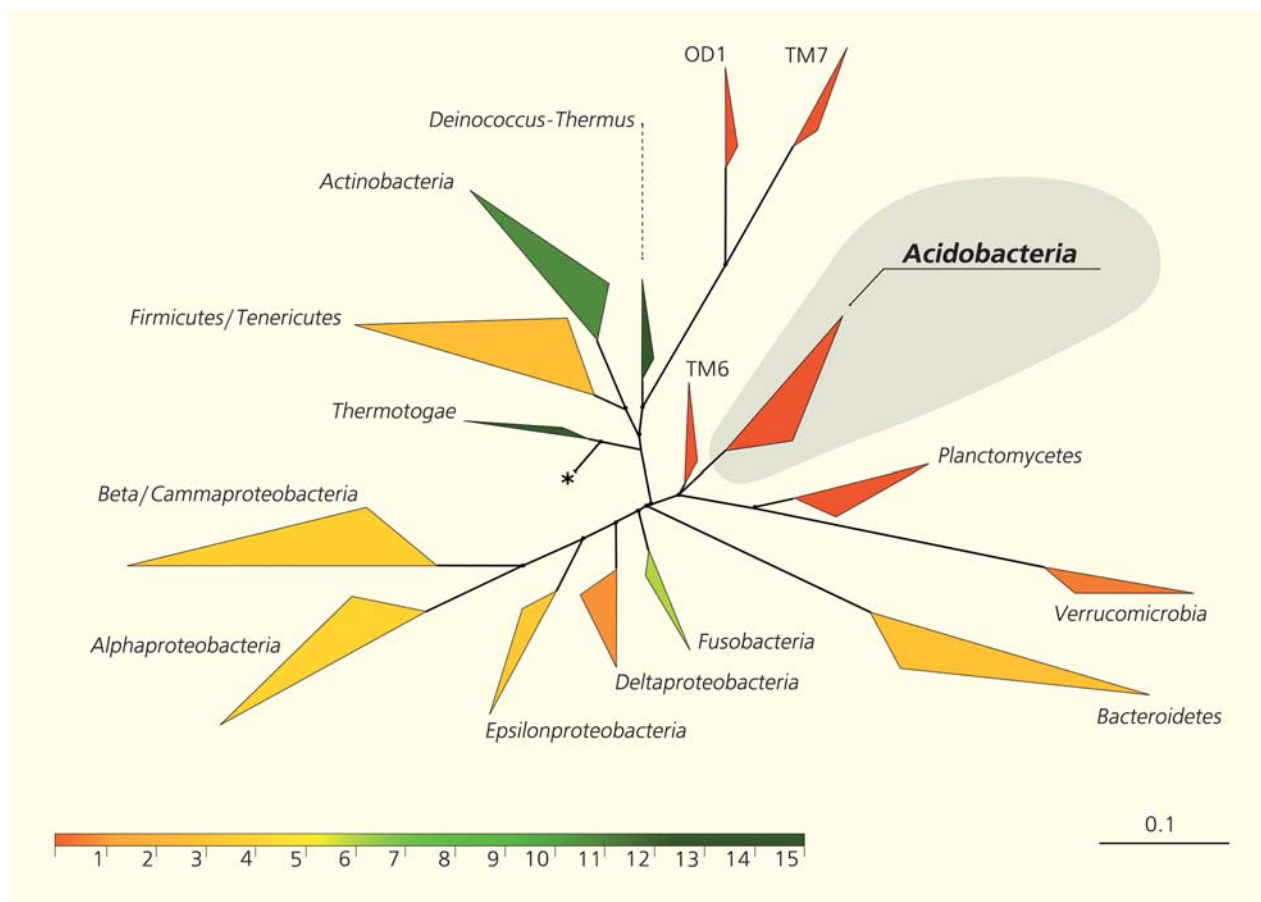
## Секреты культивирования ацидобактерий

Сразу поясним, что Acidobacteria — далеко не единственная филогенетическая группа в пределах Bacteria, которая остается малоизученной из-за недостатка культивируемых видов. Таких групп довольно много; из типичных для почв и торфов бактерий можно упомянуть веррукомикробий (Verrucomicrobia) и планктомицетов (Planctomycetes). Большая часть содержащихся ныне в GenBank нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК этих бактерий была получена в виде клонов и принадлежит формам, не выделенным пока в чистых культурах. Последовательности генов известных видов составляют лишь ничтожную часть природного разнообразия этих бактерий. Существуют, конечно, так называемые группы-кандидаты, в которых вообще нет культивируемых представителей. Они не имеют латинских наименований, а обозначаются буквенно-цифровыми индексами (например, TM6, TM7 и OD1).

Контраст же составляют достаточно хорошо изученные филогенетические линии бактерий, представителей которых микробиологи научились сравнительно неплохо культивировать (такие как Actinobacteria).

Как уже упоминалось, ко времени формального описания группы Acidobacteria в 1997 г. имелся лишь единственный охарактеризованный вид. К 2000 г. число таковых увеличилось до трех, сегодня же их не более двух десятков. Выделение и описание новых ацидобактерий происходило крайне медленно, несмотря на то что в последнее десятилетие разработаны молекулярные методы детекции этих микроорганизмов.

Еще совсем недавно для мирового научного сообщества микробиологов ключевым оставался вопрос о принципиальной возможности культивирования почвенных ацидобактерий. Положительный ответ на него получили австралийские микробиологи, которые раскрыли ряд «секретов», позволяющих выращивать эти бактерии в лаборато-



Дендрограмма, показывающая долю изученных представителей в различных филогенетических группах бактерий. Размер треугольников соответствует количеству нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК в каждой группе. Цветовая шкала отражает долю (%) таких фрагментов ДНК, принадлежащих известным видам, в общем разнообразии последовательностей отдельно взятой группы бактерий, представленных в базе данных SILVA SSU Ref NR 111. Маркер 0.1 отражает замену на нуклеотидную позицию и показывает филогенетическую дистанцию между отдельными группами бактерий. Звездочкой обозначен «корень» дендрограммы.

рии [8]. Оказалось, что необходимо, во-первых, уменьшить концентрацию веществ в питательных средах в сотни и тысячи раз по сравнению с рутинными средами; во-вторых, лучше использовать слабокислые (рН 4.5–5.5), нежели нейтральные (рН 6.5–7.5) среды; и, наконец, увеличить время инкубации посевов — от традиционных нескольких дней до нескольких месяцев. Значит, выделение ацидобактерий требует большого терпения.

Затем американские и немецкие микробиологи описали два рода типичных почвенных ацидобактерий — *Terriglobus* и *Edaphobacter*. Будучи умеренными ацидофильными аэробными гетеротрофами, они в качестве субстратов роста используют сахара и различные гетерополисахариды. Совсем недавно из аридных почв саванны изолировали и описали ацидобактерий рода *Blastocatella*. Эти мезофильные аэробы растут на комплексных белковых субстратах. Вот, собственно, и все выделенные из почв ацидобактерии.

## Ацидобактерии из болот

Настало время рассказать и об успехах российских микробиологов в непростом деле культивирования и изучения ацидобактерий. Забегая вперед, скажем, что половина их таксонов, известных сегодня, описана в нашем институте сотрудниками лаборатории микробиологии болотных экосистем.

Началась эта работа менее 10 лет назад, когда с помощью молекулярного анализа в микробных сообществах сфагновых болот обнаружили доминирующую группу прокариот — *Acidobacteria* [9]. Стала очевидной задача получить лабораторные культуры и изучить свойства этих микроорганизмов. Только как подступиться к поискам бактерий, о которых почти ничего не известно? Никто из российских микробиологов ранее с ацидобактериями не работал. Кроме нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК этих организмов мы не располагали ни информацией о морфологии клеток, ни данными об их субстратах или условиях роста. На помощь пришел упомянутый уже метод FISH с флуоресцентно-меченым зондом НоАс-1402, специфичным для определения ацидобактерий. Его мы и использовали в нашей работе как своеобразный навигатор.

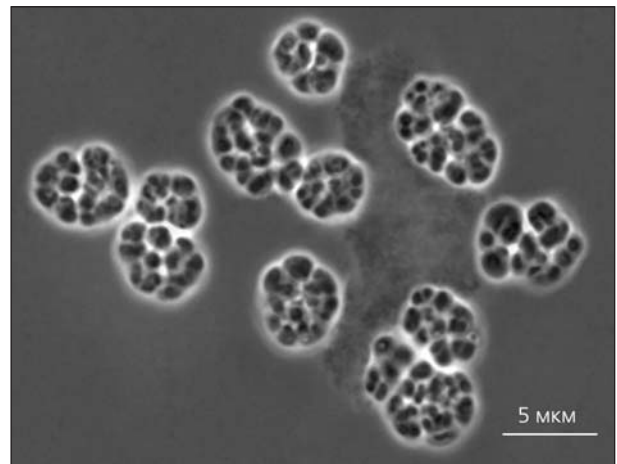
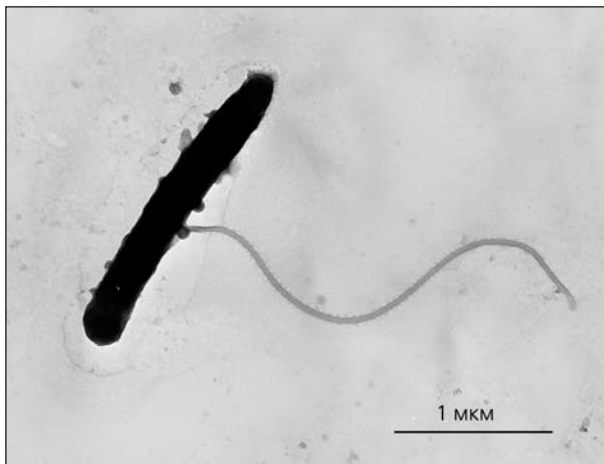
Прежде всего, чтобы понять, какие среды нужны для выделения этих микроорганизмов, в экспериментах определяли их субстратные предпочтения. В образцы торфа вносили сахара, органические кислоты, спирты, полисахариды и проверяли отклик — возрастание численности клеток. В контрольный вариант добавляли лишь воду без субстрата. После инкубации в течение нескольких дней количество клеток, специфически связывающихся с зондом НоАс-1402, увеличилось только в образцах торфа с глюкозой и некоторыми полисахаридами (пектином, ксиланом и крахмалом) [7]. По-

скольку глюкозу используют очень многие быстрорастущие бактерии (они легко обгоняют рост ацидобактерий на лабораторных средах), то выбирать ее селективным субстратом для *Acidobacteria* не стоило. Больше подходили различные гетерополисахариды растительного происхождения, в том числе пектин и ксилан, на которых растут далеко не все бактерии. В приготовлении питательных сред мы отказались от агар-агара, традиционно используемого микробиологами в качестве отвердителя, и заменили его полисахаридом микробного происхождения — фитагелем. Эти и ряд других модификаций в составе сред и условий инкубации более точно воспроизводили условия жизни микроорганизмов в болотах. Имеющийся у нас инструмент (метод FISH) позволял проследить развитие ацидобактерий в лабораторных культурах и проверить, подходят ли им выбранные нами условия. Такая стратегия себя полностью оправдала, и мы получили около двух десятков изолятов ацидобактерий разных видов. Их принадлежность к филе *Acidobacteria* подтверждена определением нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК. Что же представляют собой эти микроорганизмы и каковы их свойства?

## Типичные представители и их свойства

Один из наиболее интересных видов болотных ацидобактерий — выделенный Т.А.Панкратовым *Telmatobacter bradus* [10]. Палочковидные клетки этой бактерии снабжены толстым и довольно длинным жгутиком, позволяющим мигрировать в профиле болота, следуя колебаниям уровня воды и занимая подходящую по условиям экологическую нишу. Развивается тельматобактер в микроаэробных и анаэробных условиях, т.е. в затопленной водой части болота. *T. bradus* — это первая ацидобактерия, для которой была доказана способность разлагать целлюлозу, один из основных компонентов фитомассы растений. Особое значение имеет тот факт, что это свойство проявляется и в анаэробных условиях: тем самым бактерия получает преимущество в конкуренции с мицелиальными грибами — целлюлозолитиками, активными только в аэробных условиях. Существуют и другие, непохожие на тельматобактер болотные ацидобактерии-целлюлозолитики. У них иная морфология клеток и они предпочитают расти в аэробных условиях, но, как и тельматобактер, входят в состав гидролитического микробного сообщества болот [11].

Иные экологические функции у другой болотной ацидобактерии — *Bryobacter aggregatus*, которую выделила И.С.Куличевская [12]. Эта аэробная бактерия утилизирует галактуроновою и глюкуроновою кислоты — характерные компоненты клеточной стенки сфагновых мхов, образующиеся при их разложении.

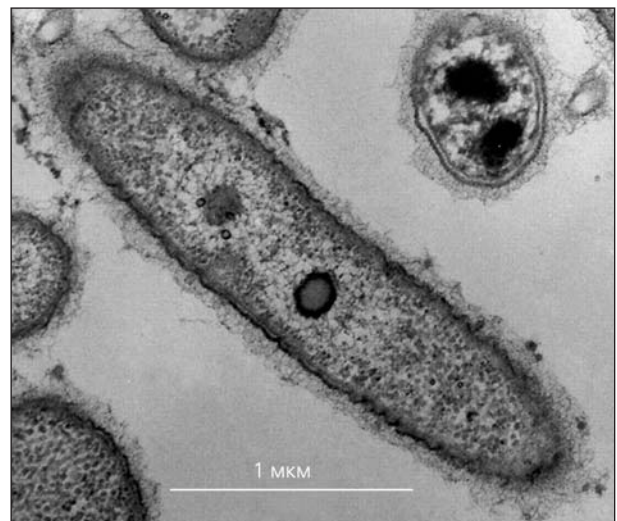
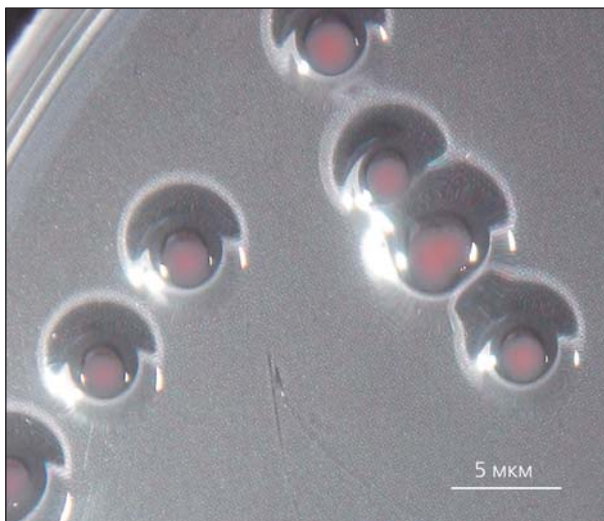


Болотные ацидобактерии целлюлозолитики. Слева — *Teltmatobacter bradus*, живущий в затопленной водой части болотного профиля и мигрирующий вслед за колебаниями воды с помощью жгутика [10]. Справа — пока не имеющая латинского названия и отличающаяся от тельматобактера морфологически ацидобактерия (штамм CC0287), которая предпочитает аэробные условия [11].

Еще одна функция ацидобактерий — деструкция капсульных полисахаридов других микроорганизмов. Клетки многих микробов (в том числе азотфиксирующих и метанотрофных бактерий), населяющих кислые сфагновые болота, покрыты хорошо развитыми слизистыми капсулами. В ассоциации с такими организмами часто обнаруживаются ацидобактерии, но их роль в сообществе оставалась неясной. Ацидобактерия *Bryocella elongata* изолирована из ассоциации с болотным метанотрофом *Methylocapsa acidiphila* [13]. В отличие от него, *B.elongata* не растет на C1-соединениях (метане или метаноле), но может развиваться в совместной культуре, используя капсульные полисахариды метанотрофа в качестве источника углерода. Способность бриоцеллы гидролизовать полисахариды

микробного происхождения легко увидеть, если посеять ее на среду, где уплотняющим агентом и единственным источником углерода служит фитагель — экзополисахарид, синтезируемый *Sphingomonas elodea*. Растущие колонии бриоцеллы погружаются в среду за счет гидролиза полисахарида. Интересно, что на ультратонких срезах клеток *B.elongata* выявлены темные включения — гранулы, судя по результатам рентгеновского микроанализа, содержащие фосфор, кальций и железо. Эта находка указывает на возможную роль бриоцеллы в биогеохимических превращениях железа в болотах. Однако проверка этого предположения требует дальнейших исследований.

Изучение физиологии и свойств перечисленных болотных ацидобактерий заложило основу



Ацидобактерия *Bryocella elongata*, гидролизующая полисахариды микробного происхождения. Слева — ее колонии, образующие «кратеры» на среде с фитагелем; справа — ультратонкий срез клетки.



понимания их экологических функций в экосистемах. По всей видимости, эти медленно растущие, но хорошо адаптированные к обитанию в кислых и холодных болотах бактерии играют роль деструкторов полимеров растительного и микробного происхождения. Иными словами, составляют важный компонент гидролитического микробного сообщества сфагновых болот. Хорошо изученные микробиологами активные гидролитики-нейтрофилы, такие как цитофаги, бациллы, клостридии, не способны развиваться в кислых сфагновых болотах, бедных доступными формами азота. Их место занимают ацидобактерии, которые осуществляют процессы деструкции очень медленно, чем и объясняется накопление неразложившихся растительных остатков и образование торфа.

\* \* \*

Подводя итог нашему рассказу, следует признать, что, несмотря на успехи последних лет в культивировании и изучении Acidobacteria, подавляющее большинство представителей этой группы еще не изучены. О том, что они, несомненно, имеют нераскрытый функциональный потенциал, говорит недавнее сенсационное сообщение об обнаружении в горячем источнике хлорофиллсодержащей, фотосинтезирующей ацидобактерии [14]. Что еще таит в себе пока ускользающее от микробиологов и остающееся неисследованным разнообразие ацидобактерий? Ответ на этот вопрос еще предстоит найти современному поколению микробиологов. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект №09-04-00004.**

## Литература

1. Liesack W., Stackebrandt E. Occurrence of novel groups of the domain Bacteria as revealed by analysis of genetic material isolated from an Australian terrestrial environment // J. Bacteriol. V.174. P.5072—5078.
2. Ludwig W., Bauer S.H., Bauer M. et al. Detection and in situ identification of representatives of a widely distributed new bacterial phylum // FEMS Microbiol. Lett. 1997. V.153. P.181—190.
3. Kishimoto N., Kosako Y., Tano T. *Acidobacterium capsulatum* gen. nov., sp. nov.: an acidophilic chemoorganotrophic bacterium containing menaquinone from acidic mineral environment // Curr. Microbiol. 1991. V.22. P.1—7.
4. Lauber C.L., Hamady M., Knight R. et al. Pyrosequencing-Based Assessment of Soil pH as a Predictor of Soil Bacterial Community Structure at the Continental Scale // Applied and Environmental Microbiology. 2009. V.75. P.5111—5120.
5. Land resources of Russia. CD-ROM database created by International Institute for Applied Systems Analysis. RAS. 2002.
6. Serkebaeva Y.M., Kim Y., Liesack W., Dedysb S.N. Pyrosequencing-based assessment of the Bacteria diversity in surface and subsurface peat layers of a northern wetland, with focus on poorly studied phyla and candidate divisions // PLOS ONE. 2013. V.8(5). P.63994.
7. Pankratov T.A., Serkebaeva Y.M., Kulichevskaya I.S. et al. Substrate-induced growth and isolation of Acidobacteria from acidic sphagnum peat // The ISME Journal. 2008. V.2. P.551—560.
8. Sait M., Hugenholtz P., Janssen P.H. Cultivation of globally distributed soil bacteria from phylogenetic lineages previously only detected in cultivation-independent surveys // Environmental Microbiology. 2002. V.4. P.654—666.
9. Dedysb S.N., Pankratov T.A., Belova S.E. et al. Phylogenetic analysis and in situ identification of Bacteria community composition in an acidic sphagnum peat bog // Applied and Environmental Microbiology. 2006. V.72. P.2110—2117.
10. Pankratov T.A., Kirsanova L.A., Kaparullina E.N. et al. *Telmatobacter bradus* gen. nov., sp. nov., a cellulolytic facultative anaerobe from subdivision 1 of the Acidobacteria and emended description of *Acidobacterium capsulatum* Kishimoto et al. 1991 // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2012. V.62. P.430—437.
11. Pankratov T.A., Ivanova A.O., Dedysb S.N. et al. Bacterial populations and environmental factors controlling cellulose degradation in an acidic sphagnum peat // Environmental Microbiology. 2011. V.13. P.1800—1814.
12. Kulichevskaya I.S., Suzina N.E., Liesack W. et al. *Bryobacter aggregatus* gen. nov., sp. nov., a peat-inhabiting, aerobic chemoorganotroph from Subdivision 3 of the Acidobacteria // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2010. V.60. P.301—306.
13. Dedysb S.N., Kulichevskaya I.S., Serkebaeva Y.M. et al. *Bryocella elongata* gen. nov., sp. nov., a novel member of subdivision 1 of the Acidobacteria isolated from a methanotrophic enrichment culture and emended description of *Edaphobacter aggregans* Koch et al. // International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology. 2008. V.62. P.654—664.
14. Bryant D.A., Costas A.M.G., Maresca J.A. et al. Chloracidobacterium termophilum an aerobic phototrophic Acidobacterium // Science. 2007. V.317. P.523—526.

# Гумус в ранних наземных экосистемах

А.Г.Заварзина, А.А.Заварзин

*В аспекте эволюции биосферы озадачивающим оказывается вопрос, образовывались ли гуминовые вещества в прокариотной биосфере? Был ли процесс гумификации до появления сфагнов как древнейших мхов?*

Г.А.Заварзин

Возникновение и эволюция наземных экосистем тесно связаны с образованием почв — продукта взаимодействия биоты с минеральным субстратом (материнской породой) в субаэральных условиях. Для почв характерно наличие органического вещества в виде детрита — отмерших остатков биоты, сохраняющих анатомическое строение, и формирующегося из них гумуса (перегноя) [1]. В гумусе различают неспецифические соединения (вещества, синтезирующиеся в живых организмах и поступающие в почву после их отмирания или с метаболитами), специфические гумусовые кислоты (темноокрашенные высокомолекулярные ароматические продукты преобразования неспецифических веществ, т.е. результат гумификации) и гумин (соединения, прочно связанные с минеральными частицами и не извлекаемые никакими растворителями). Подавляющая часть гумусовых веществ находится в виде органоминеральных образований — солей и комплексов с ионами металлов или пленок на поверхности минеральных частиц.

Из веществ гумуса наиболее значимы гумусовые кислоты и гумин (гуминовые вещества). Это характерные продукты почвообразования, достаточно устойчивые к микробной деструкции из-за своей сложной струк-



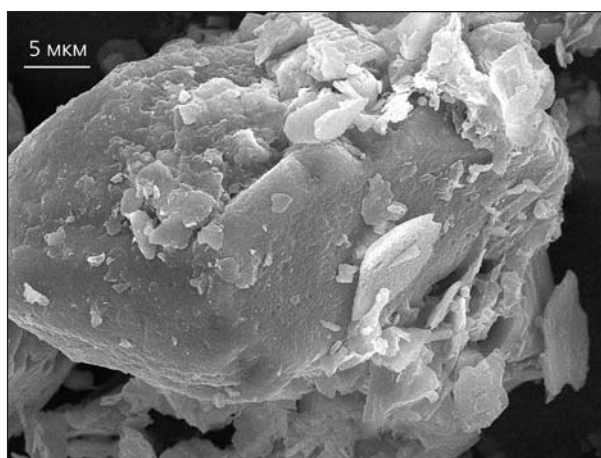
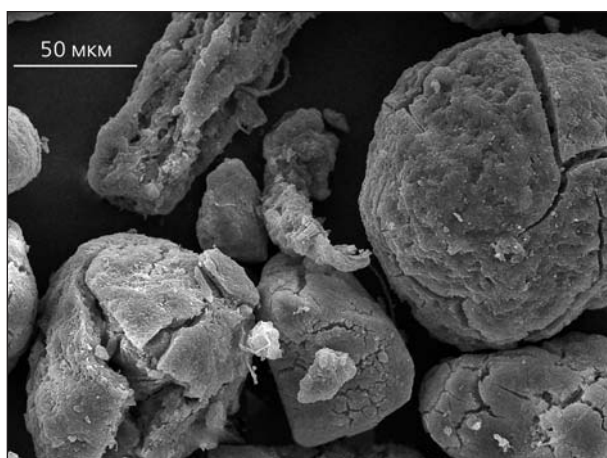
**Анна Георгиевна Заварзина**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник факультета почвоведения Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Занимается изучением процессов образования, трансформации и стабилизации почвенных гуминовых кислот, в том числе на ранних стадиях почвообразования.



**Алексей Алексеевич Заварзин**, кандидат биологических наук, проректор Санкт-Петербургского государственного университета. Занимается изучением систематики и разнообразия пельтигеровых лишайников, вопросами экологии и охраны лишайнизированных грибов.

туры и/или прочной связи с минералами. Накапливаясь в гумусе, они составляют его основу. Появление этих соединений в истории биосферы имело принципиальное значение для развития наземных экосистем. Важнейшая функция гуминовых веществ — их участие в круговороте органического углерода ( $C_{орг}$ ), в формировании и поддержании современного климата. Они служат долговременным стоком атмосферной  $CO_2$ , представляя собой первую устойчивую форму  $C_{орг}$  вне живых организмов. Благодаря гуминовым веществам в верхнем метровом слое почв сосредоточено около 2/3 органического углерода современных наземных экосистем [2]. Гумусовые кислоты участвуют также в круговороте макро- и микроэлементов за счет образования комплексов с ионами металлов. Наконец, они обеспечивают плодородие почв, отвечая за их структуру и водно-физические свойства, накапливая элементы минерального питания в доступном для растений состоянии и снижая негативное действие токсичных веществ [3].

© Заварзина А.Г., Заварзин А.А., 2013



Мощные альфегумусовые пленки на зернах минералов в иллювиально-гумусовом горизонте подзола. Справа — тонкие пленки гумуса на глинистых частицах в дерново-подзолистой почве.

Здесь и далее фото автора

Таким образом, гумификация и органоминеральные взаимодействия обуславливают круговорот  $C_{орг}$  и сопряженные циклы макро- и микроэлементов в наземных экосистемах, создавая основу для существования современной жизни во всем ее многообразии. Возникает вопрос: к какому наиболее раннему периоду в истории Земли можно отнести образование устойчивых соединений гумуса?

### Фототрофная микробиота как основа почвообразования

Древнейшее ископаемое органическое вещество почв, образованное остатками сосудистых растений, относится к торфам позднего силура — раннего девона (420—400 млн лет назад) [4]. Наиболее древние органоминеральные образования найдены в палеопочвах Антарктики и датируются средним девонам (380 млн лет назад). Древнейшие гумусовые кислоты описаны недавно в составе комплекса с минералом илистой фракции палыгорскитом в палеопочве верхнего карбона (300 млн лет назад) [5]. Проблема с палеонтологическими данными заключается в отсутствии или крайне низком содержании органики в древних отложениях из-за эрозии и минерализации. В масштабе геологического времени гуминовые вещества — это динамический резервуар со средним временем пребывания  $C_{орг}$  в аэрируемом слое почв в сотни — тысячи лет. В поверхностных горизонтах количество гумуса относительно постоянно благодаря равновесию между его новообразованием и деструкцией. Но в ходе погребения баланс сдвигается в сторону деструкции за счет отсутствия свежих органических остатков и условий для гумификации. В палеопочвах возрастом в миллионы лет органическое вещество часто составляет всего десятые доли процента,

а гуминовых веществ так мало, что их трудно идентифицировать. Поскольку эти соединения образуются, трансформируются и разрушаются в аэробных условиях, длительно сохраняться они могут, если деятельность аэробных микроорганизмов-деструкторов ограничена. Например, это недостаток кислорода (захоронение в составе торфов) или адсорбционное взаимодействие с глинистыми частицами.

Таким образом, все обнаруженное до сих пор органическое вещество почв представляет собой остатки сосудистых растений и продукты их трансформации и относится к периоду формирования почв как *корнеобитаемого слоя* (400 млн лет назад и позднее). Очевидно, что образование почв как поверхностного *органоминерального слоя* литосферы началось значительно раньше и создало базу для развития сложных жизненных форм современной биосферы, в которой преобладает цикл органического углерода. Когда же появились первые почвы?

Основную массу органического вещества продуцируют фототрофы, а гетеротрофы производят его в значительно меньших количествах. Поэтому для накопления гумуса необходимы значимая первичная продукция  $C_{орг}$  и его микробная деструкция с частичным захоронением в устойчивых соединениях. Эволюция ранней наземной микробиоты и почв должна была идти в условиях, благоприятных для последующего развития высокоорганизованных существ, приспособленных к нормальным условиям, которые можно назвать средними, или мезофильными (рН 4—7, температура 10—40°C) [6]. Следовательно, первые почвы могли появиться при массовом развитии мезофильной микробиоты. Ключевую роль в ней играли фототрофы, связывающие  $CO_2$  атмосферы в органическое вещество биомассы, и органотрофы-деструкторы, превращающие его в гумус. Какими орга-



низмами были представлены первые мезофилы и откуда они возникли?

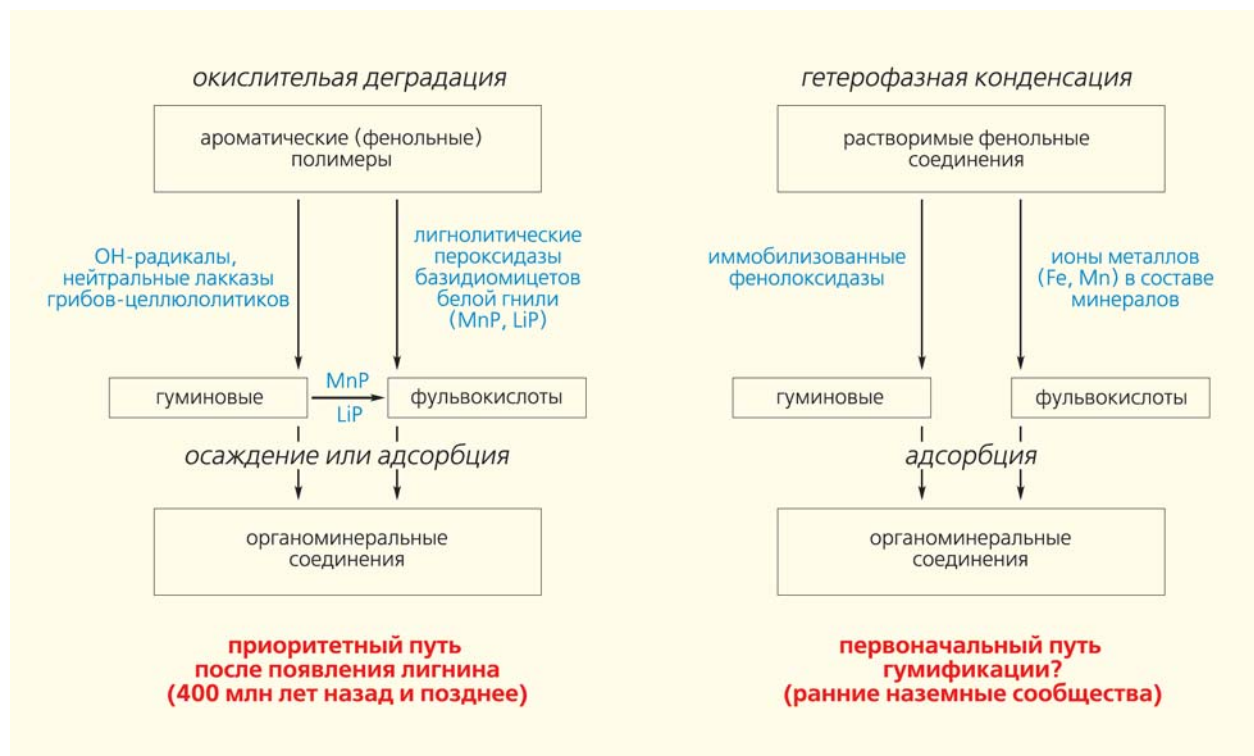
На Земле с начала формирования континентов существовали застойные мелководные пресноводные водоемы с дождевым питанием. Эти экосистемы можно считать центрами распространения наземной биоты на внутриконтинентальном пространстве [6]. Для таких биотопов характерны цианобактерии и зеленые водоросли с сопровождающими их органотрофами — бактериями и микроскопическими грибами. Их и можно назвать первичными мезофильными обитателями суши [6]. Цианобактерии (синезеленые водоросли) относятся к древнейшим фототрофным организмам. Их первые микрофоссилии датируются археем (3.5 млрд лет назад), а к палеопротерозою (2.5 млрд лет назад) разнообразие цианобактерий достигло современного уровня [6]. В мезопротерозое (около 1.2—1 млрд лет назад) появились зеленые водоросли, а к органотрофной микробиоте прибавились микроскопические грибы [8]. Начиная с этого периода можно ожидать и лишенизацию — симбиотическое взаимодействие грибов и одноклеточных водорослей. Мохообразные возникли лишь в позднем протерозое (около 700 млн лет назад) [9], а первые сосудистые растения — в палеозое (около 430 млн лет назад).

Считается, что первые почвы-пленки начали формироваться под цианобактериальными сообществами около 2 млрд лет назад [7]. До колониза-

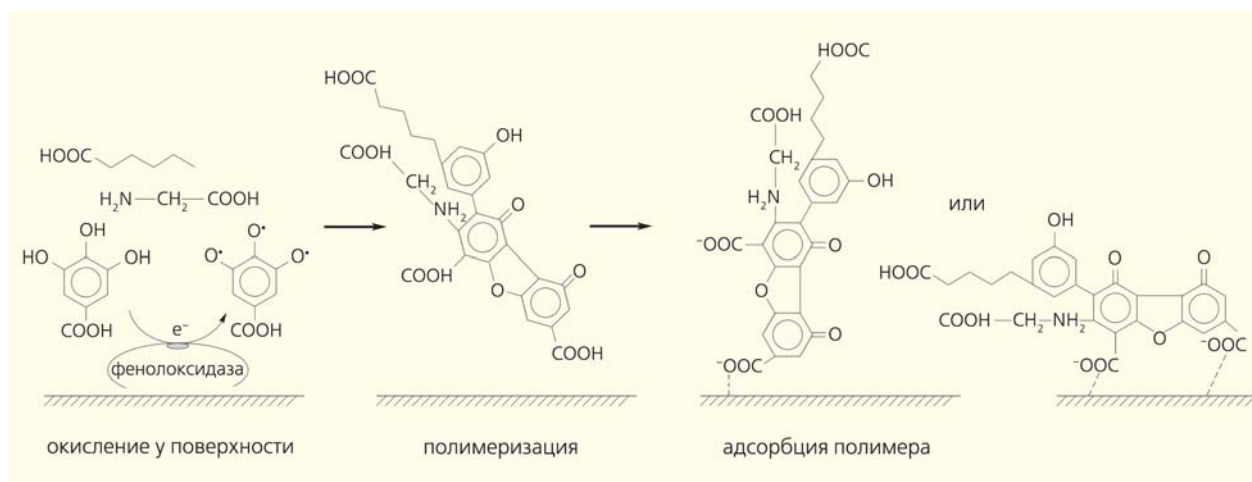
ции суши лигнифицированной растительностью остается примерно 1.5 млрд лет. Очевидно, что в этот период почвы развивались под альгомикробактериальными сообществами, в том числе и симбиотическими (лишайниками). Каков был состав гумуса на ранних этапах эволюции наземных экосистем? Когда появились устойчивые ароматические соединения — гумусовые кислоты и почему не обнаружены их ископаемые свидетельства? Чтобы попытаться ответить на вопросы, необходимо выяснить, как образуются эти соединения в современной биосфере.

### Гумус и гумификация в современных почвах

В настоящее время в гумусе преобладают гумусовые кислоты и гумин. Первые состоят из двух групп: гуминовых кислот, которые растворимы в щелочах, но осаждаются при  $\text{pH} < 2$ , и фульвокислот, растворимых в щелочах, кислотах и воде. Гумин представляет собой остаточное нерастворимое органическое вещество, согласно последним данным, почти полностью построенное из алифатических соединений. В отличие от инертного гумина, гумусовые кислоты — наиболее функционально значимая часть гуминовых веществ. Это гетерогенная темноокрашенная смесь макромолекул нерегулярной структуры и переменного состава. Гумусные кислоты полидисперсны. В одном препа-



Пути гумификации и участие окислительных ферментов в образовании гумусовых кислот.



Образование полимерных органоминеральных соединений при гетерогенной конденсации.

рате гуминовой кислоты могут присутствовать фракции с массами от 10 до >70 кДа, а фульвокислоты — от 1 до 10 кДа. В состав гумусовых кислот входят бензоидные структуры с заместителями (в основном карбоксильными и фенольными группами, у фульвокислот их больше, чем у гуминовых), N- и S-содержащие гетероциклы и алифатические фрагменты [1]. Алифатическая (гидролизуемая) часть составляет 40–60% от массы препаратов гумусовых кислот и содержит в основном аминокислоты и моносахариды, источниками которых могут быть белки и полисахариды органических остатков. В гумусовых кислотах много негидролизуемых компонентов, в продуктах их окисления имеются бензолполикарбоновые кислоты, а также фенолы, ароматические альдегиды, хиноны, азотсодержащие гетероциклы. Высокое содержание бензоидных структур служит важнейшим диагностическим признаком гумусовых кислот наземного происхождения и указывает, что их первоисточником были ароматические соединения органических остатков [1]. Как образуются гумусовые кислоты?

Синтез гумусовых кислот — это внеклеточный стохастический процесс в аэробных мезофильных условиях, ограниченный хорошо аэрируемым слоем почвы. В присутствии катализаторов фенольные предшественники окисляются до феноксирадикалов, семихинонов и хинонов. Эти реакционноспособные промежуточные продукты подвергаются затем спонтанной конденсации как друг с другом, так и с азотсодержащими соединениями, углеводами и липидами, что приводит к включению азота, сахаров и алифатических фрагментов в структуру образующихся гумусовых кислот.

Фундаментальную роль в окислительном катализе играют ионы металлов, входящие в состав минералов и активных центров ферментов. Ведущая роль в окислительной полимеризации принадлежит грибным фенолоксидазам (лакказам, тирози-

назам) и нелигнолитическим пероксидазам. Лакказа — наиболее распространенный фермент. Как и тирозиназа, она содержит медь в активном центре и катализирует окисление фенольных субстратов кислородом, который восстанавливается до воды. В присутствии лакказы образуются феноксирадикалы и семихиноны, а тирозиназы — хиноны. Пероксидаза — железосодержащий фермент, катализирующий окисление субстратов перекисью водорода. Окисление фенольных предшественников осуществляется и при наличии так называемых абиогенных катализаторов — минералов, содержащих ионы металлов с переменной валентностью (особенно  $Fe^{3+}$  и  $Mn^{4+}$ ).

Существуют два основных пути гумификации: — окислительная *биodeградация* высокомолекулярных ароматических соединений (лигнина, танинов, меланинов), присутствующих в растительных и микробных остатках; — *конденсация* низкомолекулярных веществ (простых фенолов, фенолкарбоновых кислот, фенилпропаноидов, флавоноидов), поступающих в почву в виде метаболитов или продуктов разложения наземного и корневого опада.

*Биodeградация биополимеров* представляет собой твердофазную ферментацию органических остатков грибами. Фульвокислоты образуются при расщеплении ароматических полимеров (лигнина, меланинов, гуминовых кислот) до растворимых фрагментов лигнолитическими ферментами базидиомицетов белой гнили — марганецзависимой пероксидазой и лигнинпероксидазой [10]. Высокомолекулярные продукты гумификации (гуминовые кислоты) образуются при трансформации лигнифицированных остатков грибами-целлюлолитиками, которые утилизируют полисахариды и могут лишь частично окислять ароматические биополимеры за счет продукции активных форм кислорода (базидиомицеты бурой гнили) или лакказ (микробицеты). После образования гумусовые кислоты

могут стабилизироваться в виде органоминеральных соединений. Растворимые фракции (в основном фульвокислоты) мигрируют с нисходящим током влаги и адсорбируются на поверхности тонкодисперсных минералов. В ходе миграции они могут образовывать комплексы с Fe и Al и при насыщении металлами осаждаются в виде альфегумусовых соединений. Высокомолекулярные и, соответственно, нерастворимые гуминовые кислоты могут мигрировать к месту взаимодействия в виде коллоидных растворов.

*Конденсация мономеров* представляет собой гетерогенный (гетерофазный) катализ в присутствии минеральной фазы, обладающей каталитической активностью за счет ионов металлов (Fe, Mn) или же иммобилизованных фенолоксидаз (лакказ, тирозиназ, пероксидаз). Низкомолекулярные фенольные предшественники концентрируются у поверхности минералов за счет электростатического притяжения, окисляются до промежуточных продуктов, которые полимеризуются у поверхности и сразу сорбируются, образуя органоминеральные соединения [11]. Следует отметить, что гомогенный катализ, когда компоненты реакции находятся в растворенном состоянии, в почвах практически неосуществим. Во-первых, и абиогенные катализаторы, и внеклеточные ферменты связаны в почвах с минеральной фазой (свободные ферменты очень быстро инактивируются). Во-вторых, концентрация предшественников в почвенных растворах настолько низка (0.1–100 мг/л), что их полимеризация невозможна из-за энергетических и кинетических ограничений. Природа катализатора и свойства поверхности минералов существенно влияют на молекулярные массы продуктов. Как нам недавно удалось показать, высокомолекулярные гуминовые кислоты (около 50 кДа) образуются лишь в присутствии фермента, например лакказы [11]. Абиогенные катализаторы способствуют появлению темноокрашенных продуктов, массы которых не превышают 10 кДа [12]. Что касается минеральной поверхности, то наиболее удачной для образования высокомолекулярных соединений оказывается фаза с большой площадью поверхности и положительным зарядом, обеспеченным пленками аморфных гидроокислов железа и алюминия. Такая фаза способствует электростатическому притяжению ферментов, фенольных предшественников и продуктов реакции, поскольку все они несут отрицательный заряд при значениях pH 4–6, характерных для большинства почв.

При гетерогенном катализе гумусовые кислоты очень быстро стабилизируются на поверхности минералов, образуя прочные органоминеральные соединения за счет химического взаимодействия. Продукты такой полимеризации выглядят как тонкие гумусовые пленки на минеральных частицах и могут расти в толщину за счет последующих циклов адсорбции—конденсации.

## Ранняя наземная биота и гумус

В настоящее время в большинстве наземных экосистем преобладают сосудистые растения, в тканях которых содержатся лигнин (до 40% по массе) и флавоноиды — основные ароматические предшественники гумусовых кислот. Поэтому если рассматривать количественный вклад упомянутых путей гумификации в синтез и накопление гумусовых кислот, то твердофазную ферментацию лигноцеллюлозы можно считать основным процессом в современной биосфере. Существует также гипотеза о большой роли грибных меланинов в формировании стабильных соединений гумуса, поскольку эти темноокрашенные высокомолекулярные пигменты сходны с гуминовыми кислотами по физико-химическим свойствам, в том числе по растворимости [13]. Однако в почвах под высшей растительностью участие в гумификации меланинов вряд ли количественно сравнимо с вкладом в этот процесс растительных остатков, поскольку органическое вещество микробной биомассы составляет лишь 2–3% от почвенного [3].

Как осуществлялась гумификация в ранней биосфере, в которой доминировали сообщества бактерий, водорослей и грибов? До лигнина полимерными предшественниками гумусовых кислот могли быть грибные меланины. Однако их продукция микроорганизмами несопоставима с количеством лигнина в высших растениях. Очевидно, что в отсутствие лигнина значительного накопления высокомолекулярных гуминовых кислот ожидать не следует. По-видимому, первоначально гумусовые кислоты образовывались путем гетерофазной конденсации, для которой необходимы:

- аэробные мезофильные условия;
- достаточное увлажнение;
- значимая продукция биотой растворимых фенольных предшественников;
- наличие катализаторов — фенолоксидаз или ионов Fe и Mn в составе минералов;
- минеральная фаза с высокой сорбционной способностью по отношению к ферментам (при биокатализе), субстратам-предшественникам гумусовых кислот и продуктам гумификации.

Таким образом, в геологическом времени конденсационный путь мог быть значим в период от появления на суше продуцентов фенольных соединений до колонизации суши лигнифицированной растительностью в девоне (400 млн лет назад). Первичными катализаторами гумификации могли быть ионы металлов с переменной валентностью, входящие в состав минералов. Однако синтез высокомолекулярных соединений стал возможен только с появлением биокатализаторов — фенолоксидаз. Какие наиболее ранние наземные сообщества продуцировали фенольные соединения и фенолоксидазы для гумификации?





Почвы и состав гумуса при развитии наземной биоты.

### Альгомикобактериальные сообщества

Как уже говорилось, первыми фототрофами на суше были цианобактерии, образовавшие и первые почвы-пленки [7]. Каким же был в них гумус? Клеточная стенка цианобактерий сложена полисахаридами и липидами, а фенольных соединений у них нет. Из прокариот-органотрофов лакказы и фенольные метаболиты, включая меланоидные пигменты, продуцируются актиномицетами (особенно из семейства стрептомицетовых) — бактериями с ветвящимся мицелием. Большинство актиномицетов приурочено к почвам, они могут вступать в ассоциации с водорослями, образуя лишайникоподобный таллом (актинолишайник). Однако биомасса актиномицетов вряд ли значима для гумификации. Очевидно, что, в отличие от современного гумуса, в котором много ароматических соединений, в гумусе прокариотной биосферы преобладали алифатические соединения. Это могли быть пленки полисахаридов на минеральных частицах, трудногидролизуемые вещества бактерий и водорослей. Возможно, присутствовали также меланоидины — темноокрашенные продукты конденсации сахаров и аминокислот под воздействием УФ-излучения (реакция Майярда). Длительное захоронение органического углерода могло происходить в гумине.

Следом за цианобактериями, около 1 млрд лет назад, появились зеленые водоросли [9]. Их биомасса могла быть значительной, но у них тоже практически нет фенольных соединений. Продук-

ция фенольных соединений и фенолоксидаз характерна для аэробных органотрофов — грибов, время появления которых неопределенно. По молекулярным данным, микроскопические грибы и аскомицеты присутствовали на суше уже около 1.2 млрд лет назад [9]. Микромицеты могли вытеснять бактерий-органотрофов в цианобактериальных и альгобактериальных сообществах, что стало переломным этапом в развитии наземных экосистем. С мицелиальными организмами связывают начало завоевания суши и выход в аэротоп — пространство от твердой поверхности до вершины растительного покрова [6].

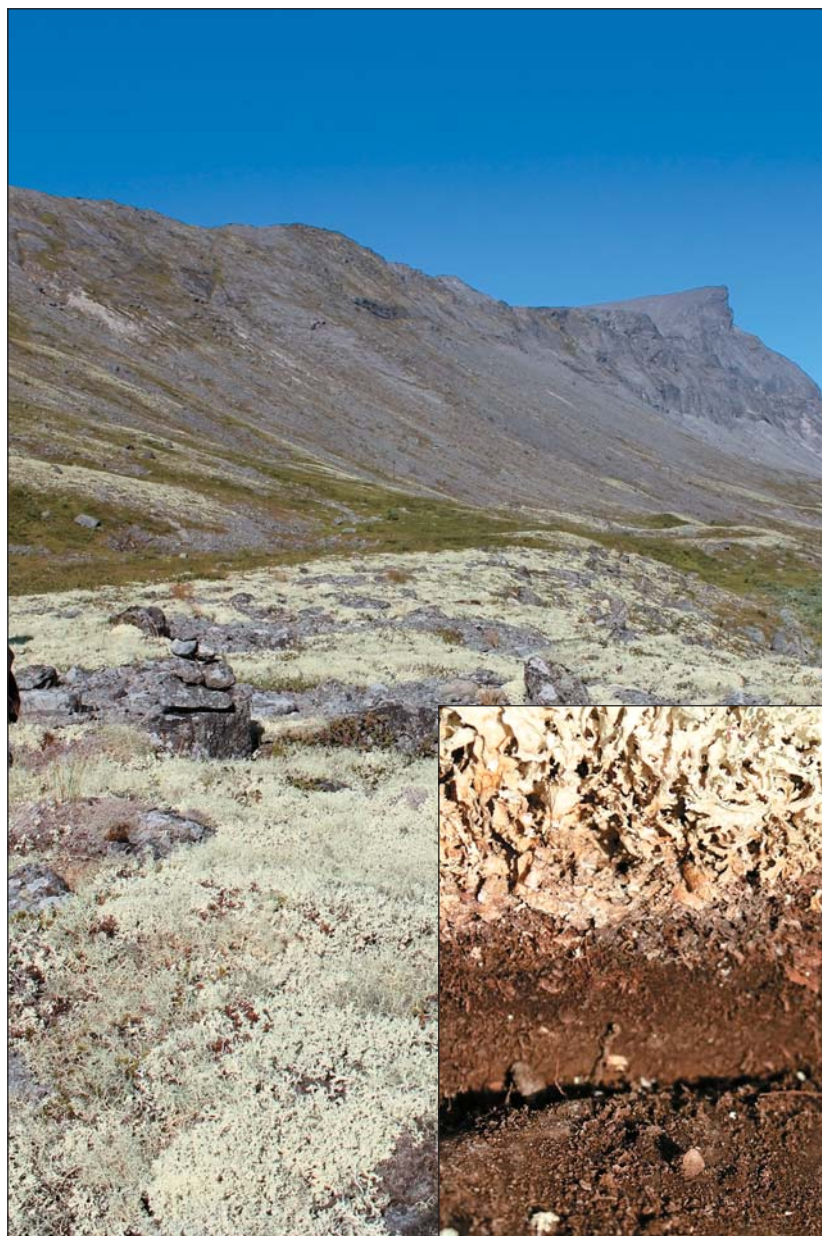
Однако накопление значительных количеств гуминовых веществ современными сообществами микроскопических грибов, зеленых водорослей и цианобактерий экспериментально не установлено. В таких сообществах необходимые для гумификации фенольные соединения фототрофы не образуют, а гумификация за счет сопровождающих их органотрофов ограничена малой биомассой. Какая же ранняя наземная биота, предшествующая высшим растениям, стала источником ароматических соединений и в то же время накапливала значительные количества биомассы? Единственно возможный ответ — лишайники. Это симбиотические ассоциации фотобионта (одноклеточной зеленой водоросли и/или цианобактерии) как первичного продуцента и микобионта (обычно аскомицета) как структурного компонента, который образует тело лишайника — таллом.

## Лишайники

Наряду с цианобактериями, зелеными водорослями и микромицетами лишайники относят к пионерной напочвенной и литофильной микрофлоре. Сообщество грибов и одноклеточных водорослей (процесс его образования называют лихенизацией), скорее всего, возникло как адаптация к жизни на незатененных и часто обсыхающих поверхностях суши [6]. Действительно, для лишайников характерна высокая устойчивость к абиотическим стрессам (резким перепадам температур, высушиванию, повышенному уровню УФ-излучения). Можно предполагать, что лишайники не вышли из водоемов, как их компоненты, а изначально были приспособлены к жизни на воздухе.

Кустистые лишайники следует считать первыми обитателями растительного покрова, вынесшими фотосинтезирующий компонент в атмосферу [6]. Из-за медленного роста лишайники не способны конкурировать с сосудистыми растениями за жизненное пространство, поэтому в настоящее время они доминируют в неблагоприятных условиях — приполярных областях (тундрах) и высокогорьях. Эти местообитания составляют около 6–8% поверхности суши, но до появления мохообразных и сосудистых растений лишайники могли быть распространены значительно шире.

Уникальность лишайников заключается в том, что они как автономная система осуществляют весь цикл почвообразования — от формирования минеральной части почв до накопления гумуса и его специфических соединений. Известно, что эпилитные лишайники, проникая гифами в породу и выделяя кислоты и другие метаболиты, способствуют выветриванию горных пород и образованию мелкозема. Но могут и стабилизировать рыхлый субстрат, на котором растут, предохраняя его от эрозии. Многие лишайники образуют значительную наземную биомассу, которая при отмирании формирует почвенное органическое вещество в виде торфянистых остатков, часто ассоциированных с мелкоземом, покрытым гумусовой пленкой.



Лишайники, образующие ягельники; на врезке — формирующаяся под ними почва. Хибинский горный массив.

Что известно о лишайниковом гумусе? Сведения об его составе ограничиваются ягельниками, кустистыми лишайниками, в которых доминируют кладонии и цетрарии. Установлено, что в продуктах их гумификации, осуществляемой в основном микромицетами, преобладают фульвокислоты, а гуминовых кислот мало, так как нет (или мало) полимерных предшественников [14]. Тем не менее существенно, что, в отличие от свободноживущих грибов и водорослей, лишайники при отмирании образуют много ароматических продуктов гумификации. Это связано с весьма разнообразной продукцией фенольных соединений в лихенизи-





Тест на лакказную активность (верхний ряд) у лишайников с субстратом, который при окислении зеленеет: *a* — пельтигеровые *Solorina crocea* и *Peltigera aphthosa*, в которых много лакказы; *б* — леканоровые *Cladonia stellaris* и *Cetraria islandica*. Внизу приведены фотографии участвующих в эксперименте видов лишайников.

рованных грибах, а также с их значительной биомассой. Из полимеров некоторые виды содержат меланины, из низкомолекулярных ароматических соединений для многих лишайников специфичен синтез особых вторичных метаболитов, так называемых лишайниковых веществ [15]. Это сборная группа соединений, составляющая 1—5%, редко до 20% сухой массы таллома; наиболее распространены усниновая кислота, депсиды, депсидоны и антрахиноны. В структуре депсидов и депсидонов обнаружены фрагменты полизамещенных фенолов и фенолкарбоновых кислот, находящиеся в различных комбинациях. Однако большинство этих вторичных метаболитов малорастворимо, что ставит под вопрос их участие в гумификации.

Недавно мы установили, что в лишайниках продуцируются водорастворимые фенольные соединения, в том числе производные фенолкарбоновых кислот — оксibenзойной, протокатеховой и ванилиновой [16]. Они широко встречаются в продуктах распада лигнина и служат предшественниками гумусовых кислот в почвах под высшей растительностью. В пельтигеровых цианолишайниках (роды *Peltigera*, *Solorina*, *Nephroma*) содержание водорастворимых фенольных соедине-

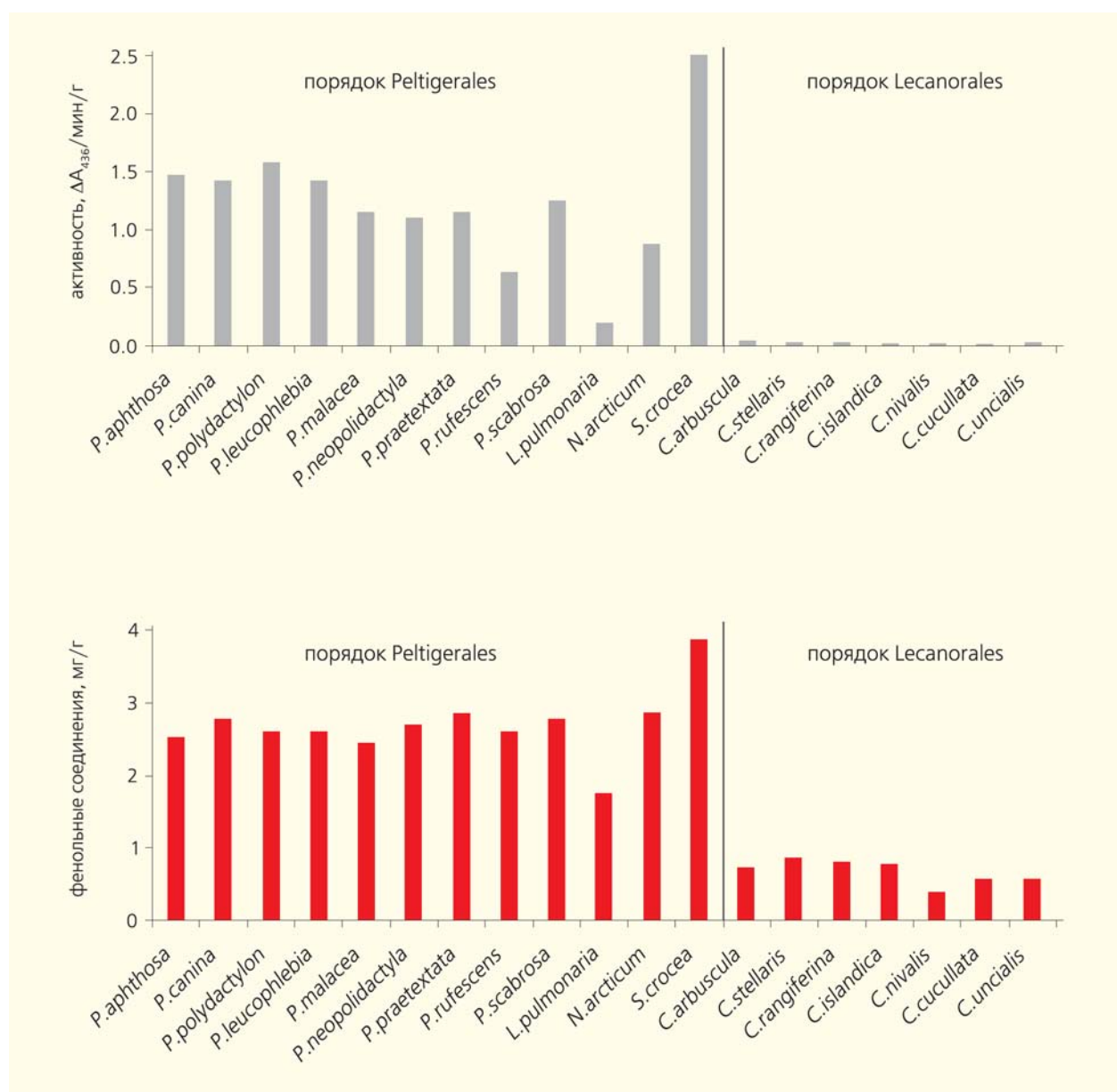
ний было в несколько раз выше, чем в леканоровых (роды *Alectoria*, *Cladonia*, *Cetraria*). Интересно, что в пельтигеровых крайне мало специфических лишайниковых веществ, но, как недавно выяснилось, высоки лакказная и тирозиназная активности [17, 18]. Таким образом, уровень растворимых фенольных соединений в изученных видах лишайников находится в обратной зависимости от содержания лишайниковых веществ и в прямой от наличия лакказы.

Поскольку растворимые фенольные соединения и фенолоксидазы легко вымываются из пельтигеровых лишайников, этот комплекс может участвовать в синтезе гумусовых кислот путем гетерофазного катализа. Мы показали это экспериментально, инкубируя смесь по молекулярной массе фенолкарбоновых кислот и азотсодержащих соединений в присутствии лакказы лишайника *Solorina crocea*, которая была сорбирована на каолините, покрытом аморфной гидроокисью алюминия. Минерал приобретал бурю окраску за счет продуктов реакции. При их экстракции и анализе обнаружилось, что по молекулярной массе и спектрам в видимой области они соответствуют гуминовым кислотам.



Гумификация в почвах под лишайниками требует дальнейшего изучения. Но имеющиеся данные позволяют заключить, что она может идти по двум направлениям: образованию в основном растворимых продуктов (фульвокислот) при трансформации мортмассы лишайников, составляющих ягельники; образованию высокомолекулярных органических соединений за счет фенолоксидаз и фенольных предшественников, вымываемых осадками из пельтигеровых лишайников и взаимодействующих в присутствии минеральной фазы. При малой активности фенолоксидаз и микробиоты, участвующей в гумификации, под лишайниками формируются примитивные почвы — механическая смесь детрита с мелкоземом.

Таким образом, возникновение современного гумуса, содержащего значительное количество гумусовых кислот, можно связать с развитием на суше лишайнизированных грибов. К сожалению, точное время появления лишайников неизвестно, а их ископаемые формы крайне малочисленны. Беспорный ископаемый лишайник, *Winfrenatia*, датируется ранним девонном — 400 млн лет назад [19]. Данные молекулярного анализа косвенно свидетельствуют, что аскомицеты, появившиеся около 1.2–1 млрд лет назад [9], могли вступать в ассоциации сначала с цианобактериями, а потом и с зелеными водорослями. Теоретически предки современных асколишайников могли появиться уже в неопротерозе.



Лакказная активность в лишайниках (вверху) и содержание в них растворимых фенольных соединений (внизу).

\* \* \*

Итак, современные биоценозы мохово-лишайниковой тундры можно рассматривать как аналог реликтовой экосистемы, соответствующей длительному развитию биоты суши до появления сосудистых растений. Формирующиеся под лишайниками почвы со слоем детрита на разных стадиях деструкции и с гумусовыми кутанами на минеральных частицах могли в прошлом служить переходом от водорослевых и бактериальных почв

пленок к современным почвам. Преобладание растворимых продуктов при гумификации и малая мощность гумусового горизонта — возможные причины плохой сохранности органического вещества, соответствующего альгомикобактериальной биосфере. В результате нижняя граница ископаемых почв сформирована лигнифицированной растительностью в девоне. Поэтому темные органические пленки заслуживают особого внимания при палеонтологических исследованиях как диагностический признак почвы. ■

**Работа выполнена при поддержке программы №28 Президиума РАН и проекта РФФИ №13-04-01693.**

## Литература

1. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М., 1990.
2. Орлов Д.С. Гуминовые вещества в биосфере // Соросовский образовательный журн. 1997. №2. С.56—63.
3. Hedges J.I., Oades J.M. Comparative organic geochemistries of soils and marine sediments // Org. Geochem. 1997. V.27. №7—8. P.319—361.
4. Retallack G.J. Soils of the past: an introduction to paleopedology. Oxford, 2001.
5. Алексеева Т.В., Кабанов П.Б., Золотарева Б.Н. и др. Гуминовые вещества в составе палыгорскитового органо-минерального комплекса из ископаемой почвы верхнего карбона Южного Подмосквья // ДАН. 2009. Т.425. №2. С.265—270.
6. Заварзин Г.А. Эволюция прокариотной биосферы: микробы в круговороте жизни. 120 лет спустя: чтение им.С.Н.Виноградского. М., 2011.
7. Добровольский Г.В. Роль и значение почв в становлении и эволюции жизни на Земле // Эволюция биосферы и биоразнообразие: к 70-летию А.Ю.Розанова. М., 2006.
8. Соколов Б.А., Федонкин М.А. Ранние этапы развития жизни на Земле. Современная палеонтология. М., 1988. Т.2. С.118—142.
9. Heckmann D.S., Geiser D.M., Eidell et al. Molecular evidence for the early colonization of land by fungi and plants // Science. 2001. V.293. P.1129—1133.
10. Zavarzina A.G., Lisov A.V., Leontievsky A.A., Zavarzin A.A. Fungal oxidoreductases and humification in forest soils // Soil Enzymology. 2011. P.187—205.
11. Huang P.M. Abiotic catalysis // Handbook of Soil Science. Boca Raton, 2000. P.303—334.
12. Zavarzina A.G. Heterophase synthesis of humic acids in soils by immobilized phenol oxidases // Soil Enzymol. 2011. P.207—228.
13. Звягинцев Д.Г., Мирчинк Т.Г. О природе гумусовых кислот почв // Почвоведение. 1986. №5. С.68—75.
14. Паринкина О.М., Пийн Т.Х., Переверзев В.Н. Минерализация и гумификация лишайников в природных условиях Кольского полуострова // Почвоведение. 1998. №10. С.1225—1232.
15. Nash T.H. Lichen Biology. L., 2008.
16. Загоскина Н.В., Николаева Т.Н., Лапшин П.В. и др. Водорастворимые фенольные соединения у лишайников // Микробиология. 2013. Т.82. №4.
17. Заварзина А.Г., Заварзин А.А. Лакказная и тирозиназная активности у лишайников // Микробиология. 2006. Т.75. С.630—641.
18. Laufer Z., Beckett R.P., Minibayeva F.V. Co-occurrence of the multicopper oxidases tyrosinase and laccase in lichens in sub-order Peltigerineae // Ann. Bot. 2006. V.98. P.1035—1042.
19. Taylor T.N., Hass H., Remy W., Kerp H. The oldest fossil lichen // Nature. 1995. V.378. P.244.

# Железоредукторы содовых озер — реликты «железного века»?

*...Нельзя ли на основе антитезиса построить столь же непротиворечивую картину, как на основе тезиса? Возникновение антитезиса требует вопроса. Знание не имеет вопросов. Возникновение антитезиса требует сомнения. Знание не сомневается.*

Г.А.Заварзин. Из дневника (2006)

Д.Г.Заварзина

Эпиграф к статье выбран не случайно. В 1993 г. Г.А.Заварзин предложил гипотезу «содового континента» как антитезис традиционному представлению о морском происхождении биоты и гипотезе «содового океана» С.Кэмпе и Э.Дегенса (1985), полагавших, что в раннем протерозое вода океана могла быть щелочной. По мнению Заварзина, углекислотное выветривание горных пород, ведущее к образованию содовых водоемов, было доминирующим процессом в раннем протерозое. Действительно, содовые озера образуются в результате универсальных физико-химических закономерностей взаимодействия воды и растворенных в ней газов с минералами горных пород. Поскольку эти закономерности действовали в прошлом и действуют сейчас, то к самому процессу вполне применим принцип актуализма. Отсутствие почвы и растительности и, возможно, более высокая температура (30–40°C), существовавшая в то время на поверхности Земли, способствовали быстрому испарению воды и концентрированию солей в бессточных областях. Поэтому древние содовые водоемы могли занимать гораздо большие площади, чем современные.

Рассматривая возможную первичную континентальную



**Дарья Георгиевна Заварзина**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории реликтовых микробных сообществ Института микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН. Занимается изучением микробного преобразования минералов железа в восстановительной обстановке.

микробиоту докембрия, Заварзин указывал на определенные условия ее развития: отсутствие или крайне низкая концентрация  $O_2$  в атмосфере; общий дефицит окислителей; более тонкая континентальная кора с повышенными геотермальным градиентом и гидротермальной активностью (она служит источником восстановленных химических соединений, таких как водород); усиленное углекислотное выветривание, ведущее к содовому засолению. Все это способствовало возникновению алкалофильного анаэробного микробного сообщества.

До массового распространения эукариот около 1 млрд лет назад работу биогеохимических циклов поддерживали прокариоты. Сегодня автономные прокариотные сообщества, аналогичные докембрийским, остались только в экстремальных местах: это морские и наземные гидротермальные системы, гиперсолёные морские лагуны и содовые озера. В последних проявляются сразу три основных параметра экстремальности — высокие pH, концентрация растворенных солей и температура. Для подавляющего большинства эукариот такие условия непригодны для жизни, поэтому сегодня содовые озера можно считать своего рода прокариотными заповедниками [3].

В настоящее время содовые озера образуются во внутриконтинентальных областях за счет атмосферного гидрологического цикла и углекислотного выветривания. Мозаичные локальные условия и состав выветриваемых горных пород определяют разнообразие таких водоемов. Для их образования необходимы отсутствие промывного режима и превышение суммы карбонатов над суммой щелочнозе-

© Заварзина Д.Г., 2013



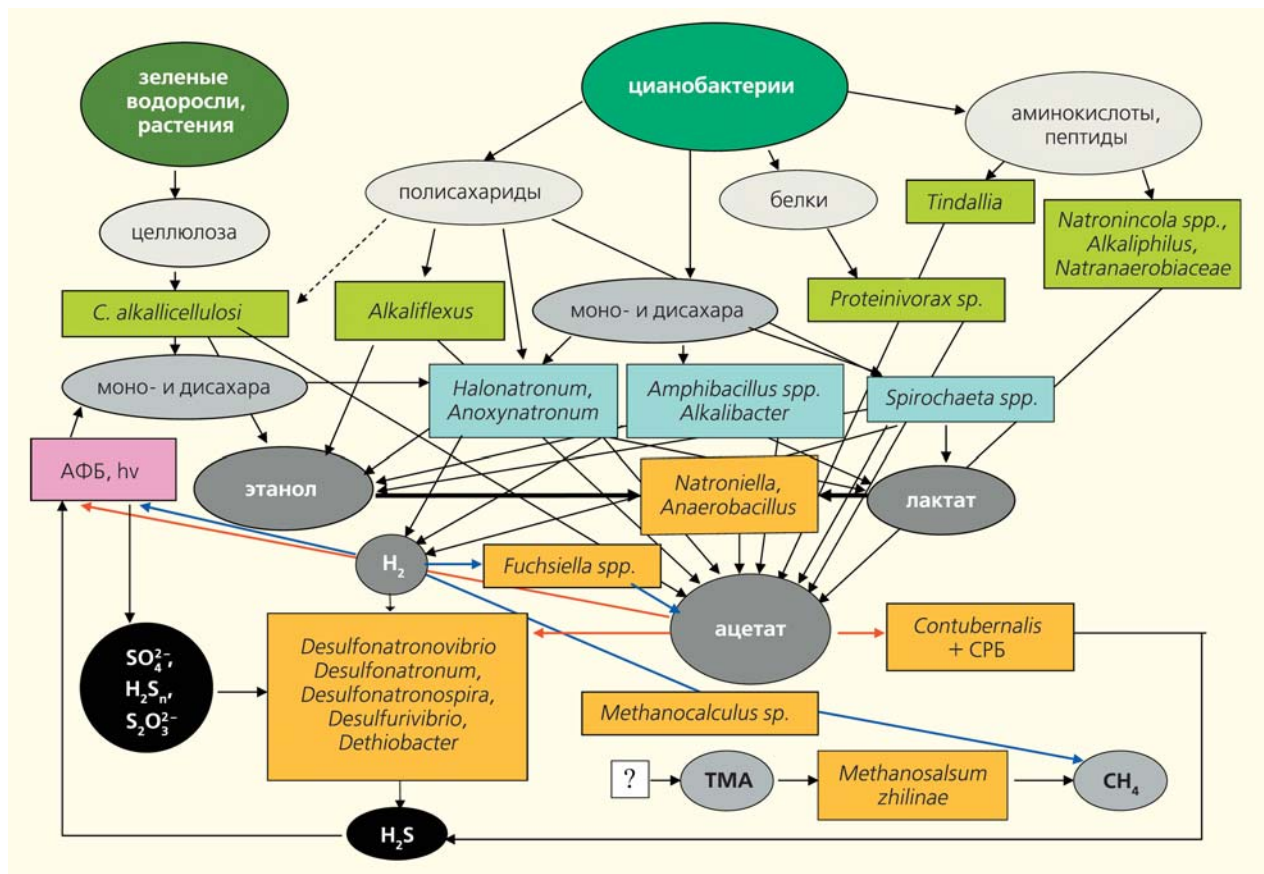
мельных металлов, поэтому в гидрохимическом составе озерных вод отсутствуют катионы магния и кальция. Анионный состав содовых озер представлен карбонат- и бикарбонат-ионами, присутствуют также хлорид- и сульфат-ионы (их концентрация может быть весьма существенной). Таким образом, это карбонат-бикарбонатная буферная система, благодаря которой pH поддерживается в щелочной области.

### Жители содовых озер

Предложенный Заварзиным системный подход к изучению микробных сообществ был применен в его лаборатории, где начались исследования функционального разнообразия микроорганизмов. Результатом многолетнего изучения современных алкалофильных сообществ содовых озер Восточно-Африканского рифта и Центральной

Азии стало доказательство их функциональной полноценности. Они могут существовать автономно за счет замкнутости трофических цепей и биогеохимических циклов основных биогенных элементов (C, N). Поскольку в них были обнаружены представители всех филогенетических ветвей, они могут быть источником дальнейшего биоразнообразия. Но не только. При уменьшении экстремальности условий они могут переходить в «нормальные» наземные сообщества, прежде всего в сообщества почв и континентальных вод [4].

Трофические взаимодействия алкалофилов были предметом подробного изучения в лабораториях нашего института [5, 6]. Результаты этих исследований с применением принципа актуализма, введенного для бактериальной палеонтологии Г.А.Заварзиным и А.Ю.Розановым, позволяют представить структуру анаэробных сообществ докембрия. Их продуценты — планктонные и бентосные цианобактерии, которые на свету выделя-



Трофические взаимодействия в анаэробном алкалофильном микробном сообществе с аллохтонным (целлюлоза) и аутохтонным (цианобактерии) органическим веществом. Указанные здесь микроорганизмы не исчерпывают таксономического разнообразия, это лишь примеры той или иной физиологической группы. На стадии образования—потребления органических кислот, спиртов и водорода имеется сеть трофических взаимодействий. Это говорит о том, что, во-первых, разложение органического вещества может идти и более короткими маршрутами, минуя сахаролитический этап; во-вторых, благодаря множеству вариантов путей деструкции такое сообщество обладает повышенной устойчивостью к внешним воздействиям, поскольку при исключении целых групп анаэробных деструкторов утилизацию органического вещества продолжат другие группы.

ют кислород, а в темноте переходят к анаэробному дыханию. Значительные суточные колебания содержания кислорода в водном и придонном слоях содовых озер способствуют развитию факультативных анаэробов — микроорганизмов, способных развиваться как при наличии кислорода, так и без него. Помимо цианобактерий продуцентами служат также аноксигенные фототрофы, содержащие бактериохлорофиллы и другие компоненты, необходимые для фотосинтеза. В лаборатории В.М.Горленко такие бактерии изучены детально [5]. Их основная функция в современных содовых озерах заключается в регенерации окисленных соединений цикла серы. Происходит это в процессе светозависимого окисления сульфида, образуемого сульфат- и сероредуцирующими бактериями. Само окисление неразрывно связано с возвратом органического вещества в малый круговорот органического углерода. В ряде случаев аноксигенный фотосинтез может играть определяющую роль в образовании органического вещества. Например в оз.Хилганта (Юго-Восточное Забайкалье) доля оксигенного фотосинтеза составляет только 3-4%, все остальное — результат бескислородного процесса. Фототрофные бактерии участвуют также в утилизации молекулярного водорода и органических соединений, образуемых первичными и вторичными деструкторами.

Трофические взаимодействия в анаэробном алкалофильном сообществе были предметом 20-летнего изучения в лаборатории Заварзина и продолжаются до сих пор. На сегодня удалось не только установить основные этапы анаэробной деградации органического вещества, но и выделить микроорганизмы, ответственные за это [6, 7]. Первый этап — гидролиз полисахаридов (в основном целлюлозы) и белковых соединений, составляющих основную часть клеток цианобактерий, — осуществляют микроорганизмы-целлюлолитики и протеолитики.

Следует сразу оговориться, что современное содовое сообщество и предполагаемое докембрийское на этом этапе принципиально отличаются. Сегодня в содовых озерах есть аллохтонное (т.е. привнесенное извне) и автохтонное (местное) органическое вещество. Первое состоит из остатков высшей растительности, в основном из целлюлозы, а второе — главным образом из белков, источником которых служат клетки первичных продуцентов микробных сообществ (цианобактерий и аноксигенных фототрофов). Говоря о микробном сообществе архея—раннего протерозоя, необходимо исключить из системы аллохтонную целлюлозу, поскольку высшей растительности тогда не существовало и, следовательно, первый этап разложения органического вещества могли осуществлять микробы-протеолитики.

Однако алкалофильные микроорганизмы, способные перерабатывать мортмассу цианобактерий, не были известны. Лишь недавно в нашей ла-

боратории сумели изолировать из содового озера Танатар (Алтай) высокоспециализированную бактерию, которая при pH 10 разлагала и белки (альбумин, казеин или желатин), и мортмассу цианобактерий *Microcoleus chthonoplastes* и *Phormidium rezii*. Филогенетически бактерия вместе с ранее известным, но неклассифицированным родом *Anaerobranca* образует новое семейство *Proteinoivoraхасеае* в порядке *Clostridiales* и представляет новый род и вид *Proteinivorax tanatarense* [8].

Микроорганизмы, ответственные за разложение целлюлозы в анаэробной зоне содовых озер, также долгое время оставались неизвестными. Первая целлюлозолитическая бактерия — *Clostridium alkalicellulosi* — была выделена в лаборатории из донных осадков содового озера Верхнее Белое. Эта галоалкалофильная бактерия расщепляла целлюлозу до этанола, лактата, ацетата и водорода. Изолированная из осадков того же озера анаэробная цитофага *Alkaliflexus imshenetskii* способна гидролизовать широкий круг полисахаридов как запасных, так и входящих в структурные компоненты клеток, но не целлюлозу [6].

Второй этап разложения органического вещества в анаэробном алкалофильном сообществе осуществляют сахаролитические и пептолитические бактерии. Они специализируются на сбраживании ди- и моносахаридов, а также аминокислот — продуктов гидролиза белков. Особняком в этой группе стоят диссипотрофы, использующие низкомолекулярные продукты гидролиза в низких концентрациях. Классический пример этой подгруппы — спирохеты, обнаруженные и в высокоминерализованных африканских, и в низкоминерализованных озерах Центральной Азии [6]. Спирохеты быстро выявляются еще в накопительной культуре благодаря своей яркой морфологии (клетка представляет собой спирально изогнутую нить), определяемой их пищевой стратегией: большая поверхность позволяет улавливать необходимые субстраты даже в низких концентрациях. Основные продукты обмена спирохет — ацетат, лактат, этанол и водород. В анаэробном сообществе активно потребляют сахара и хемоорганотрофы. Целый ряд таких бактерий выделен из содовых озер. Среди них были хлорид-зависимые галоалкалофильные представители рода *Halanaerobacter*. Кроме них обнаружены галотолерантные, которые хотя и не нуждаются в хлорид-ионе, но выдерживают высокие концентрации NaCl. Это натронофилы, относящиеся к родам *Amphibacillus* и *Anoxytnatronum* [6]. Продуктами брожения этих микроорганизмов на сахарах, образующихся в природе, также были ацетат, водород, лактат, этанол и формиат.

Заключительный этап разложения органического вещества осуществляют вторичные анаэробы, метаболизм которых основан на окислительно-восстановительных реакциях с участием химических элементов с переменной валентностью.

Полное разложение органического вещества зависит от удаления водорода, накапливающегося на предыдущих этапах деструкции [9]. Традиционно в алкалофильном сообществе выделяют три основные группы вторичных анаэробов, использующих в обмене водород: метаногены, ацетогены и сульфидогены.

Эти группы были изучены в смешанной пробе из девяти содовых озер Тувы [6] и в пробах из содовых озер Танатар с разной минерализацией [10]. Сравнение результатов показало, что везде удаление  $H_2$  в основном обеспечивают серо-, тиосульфат- и сульфатредукторы, поскольку в современных содовых озерах доминирует цикл серы. Несмотря на преобладание карбонат- и бикарбонат-ионов, содержание сульфатов в содовых озерах достаточно высоко (независимо от степени их минерализации), чтобы обеспечить развитие сульфатредукторов. Кроме того, в щелочных условиях элементная сера вступает в реакцию с сероводородом и образует растворимую полисульфидную форму  $H_2S_n$ , окрашивающую растворы в желтый цвет. Сера в доступной растворенной форме в щелочных условиях дает преимущество сероредукторам, и это отражают результаты исследований вторичных анаэробов в озерах Танатар. Как установил Б.Б.Намсараев, в донных осадках озер Юго-Восточного Забайкалья и Монголии активность сульфатредуцирующих бактерий высока, что указывает на определяющую роль этой группы на заключительных этапах разложения органического вещества [5]. Избыток сероводорода, который не связывается железом, окисляется до сульфата тионовыми бактериями или аноксигенными фототрофами и поступает в рецикл [5]. Из содовых озер выделен целый ряд алкалофильных использующих водород сульфатредукторов, которые относятся к родам *Desulfonatronum*, *Desulfonatronovibrio* [6] *Desulfonatronospira*, *Desulfurivibrio*, *Detbiobacter* [11]. В современных условиях метаногены и ацетогены играют явно подчиненную роль в удалении водорода в алкалофильном сообществе, хотя их присутствие установлено [10]. Ацетат — это главный метаболит, накапливающийся при разложении органического вещества. До недавнего времени не удавалось выделить алкалофильных сульфидогенов, окисляющих ацетат. Сейчас такой организм — *Desulfurivibrio alkaliphilus* — описан Д.Ю.Сорокиным [11]. Альтернативой алкалофильному сульфидогенезу на ацетате (доноре) служит его синтрофное окисление, при котором действует пара микроорганизмов: один окисляет ацетат или другую органическую кислоту, а второй немедленно удаляет из системы водород, что делает реакцию термодинамически выгодной [9]. Нам удалось получить бинарную синтрофную сульфидогенную культуру, состоящую из споровой палочки *Contubernalis alkalaceticum* (семейство Syntrophomonadaceae), окисляющей ацетат, и *Desulfonatronum cooperati-*

*um*, использующего водород. Выделенная ассоциация помимо ацетата окисляла этанол, пропанол, изопропанол, серин, фруктозу, изомасляную кислоту. При этом *S.alkalaceticum* не могла расти вне ассоциации и стала примером первой алкалофильной облигатно синтрофной бактерии [6].

Синтрофные взаимодействия еще далеко не изучены, но уже сегодня есть основания предполагать, что они могут играть определяющую роль в анаэробной утилизации ацетата как наиболее устойчивого к окислению органического соединения.

Приведенный здесь короткий анализ трофических взаимодействий в анаэробном сообществе позволяет представить последовательность разложения сложных органических соединений до углекислоты, замыкающей цикл углерода. Для получения чистых культур микробов, отвечающих за тот или иной этап деструкции, требуется огромная работа. Представленная выше схема включает далеко не все микроорганизмы, выделенные в ходе изучения содовых озер. А сколько их еще осталось не исследованных?

## Железоредукторы

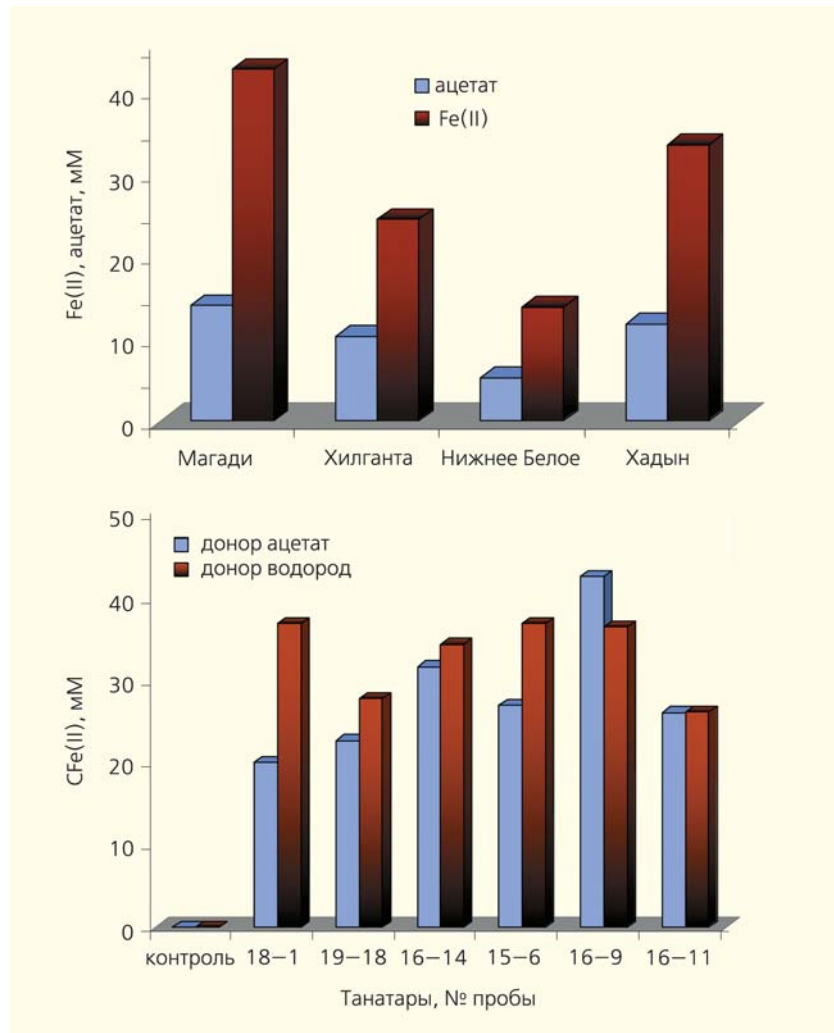
Сегодня знания о жителях содовых озер и о трофических взаимоотношениях в них позволяют использовать алкалофилов для построения возможной модели микробного сообщества докембрия. Однако неясно, какая группа вторичных анаэробов в содовых озерах далекого прошлого могла удалять водород и ацетат при дефиците сульфата? Конечно, тогда в редуцированном микробном цикле серы круговорот мог осуществляться в пределах «малого» цикла сульфид-элементная сера. Существование более окисленных форм серы в количестве, близком к современному, представляется маловероятным. При редуцированном цикле серы функцию утилизации водорода могли выполнять также гидрогенотрофные метаногены и ацетогены. Основанием для такого предположения служит выделенный и описанный нами первый алкалофильный литотрофный гомоацетоген *Fuchsiella alkaliacetigena* [10], осуществляющий реакцию  $4H_2 + 2CO_2 = CH_3COOH + 2H_2O$ . Ранее микробы с такой функцией в содовых озерах не были известны. Правда, в случае ацетогенеза не решается вопрос прямой утилизации ацетата, поскольку пока неизвестны растущие на нем метаногены. Но она могла происходить за счет синтрофного окисления микроорганизмами, которые фенотипически близки к *S.alkalaceticum* [6].

Однако при реконструкции структуры докембрийского сообщества следует учитывать, что 3.4—1.8 млрд лет назад на Земле доминировал цикл железа (часто этот период называют «железным веком»). Бесспорным доказательством тому служат отлагавшиеся тогда громадные осадочные форма-



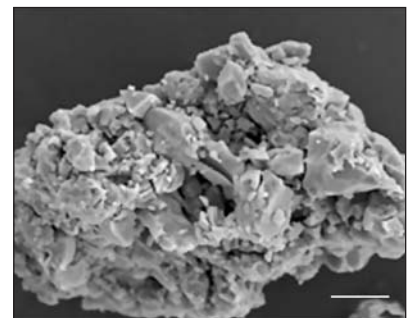
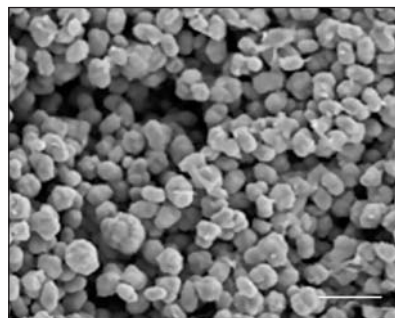
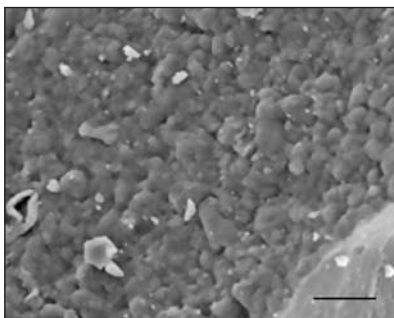
ции железистых кварцитов, состоящие преимущественно из слоев кварца, гематита и магнетита. На всех континентах встречаются эти формации, но у специалистов до сих пор нет единого мнения об их генезисе. Основную сложность вызывает чередующаяся тонкая слоистость окисленных и восстановленных окислов железа и кварца, которую трудно объяснить чисто химическим образованием.

В последнее время появляется все больше данных об активном участии микроорганизмов в формировании этих пород. Речь идет о группе диссимиляторных железоредущих бактерий, открытой 30 лет назад и с тех пор активно изучаемой. Эти микроорганизмы способны получать энергию, восстанавливая различные соединения трехвалентного железа (в частности нерастворимые минералы), используя и органические, и неорганические восстановители. Особый интерес геологов к этой группе вызван тем, что в лабораторных условиях при восстановлении железоредукторами ферригидрита (рентгеноаморфной гидроокиси железа) образуется магнетит — типоморфный минерал железистых кварцитов. Исследования последнего десятилетия показали, что железоредукторы распространены практически во всех экологических нишах на Земле. Оказалось, что восстанавливать железо могут очень многие функциональные группы микроорганизмов, например сульфатредукторы, что служит подтверждением древности этого процесса [13–15].

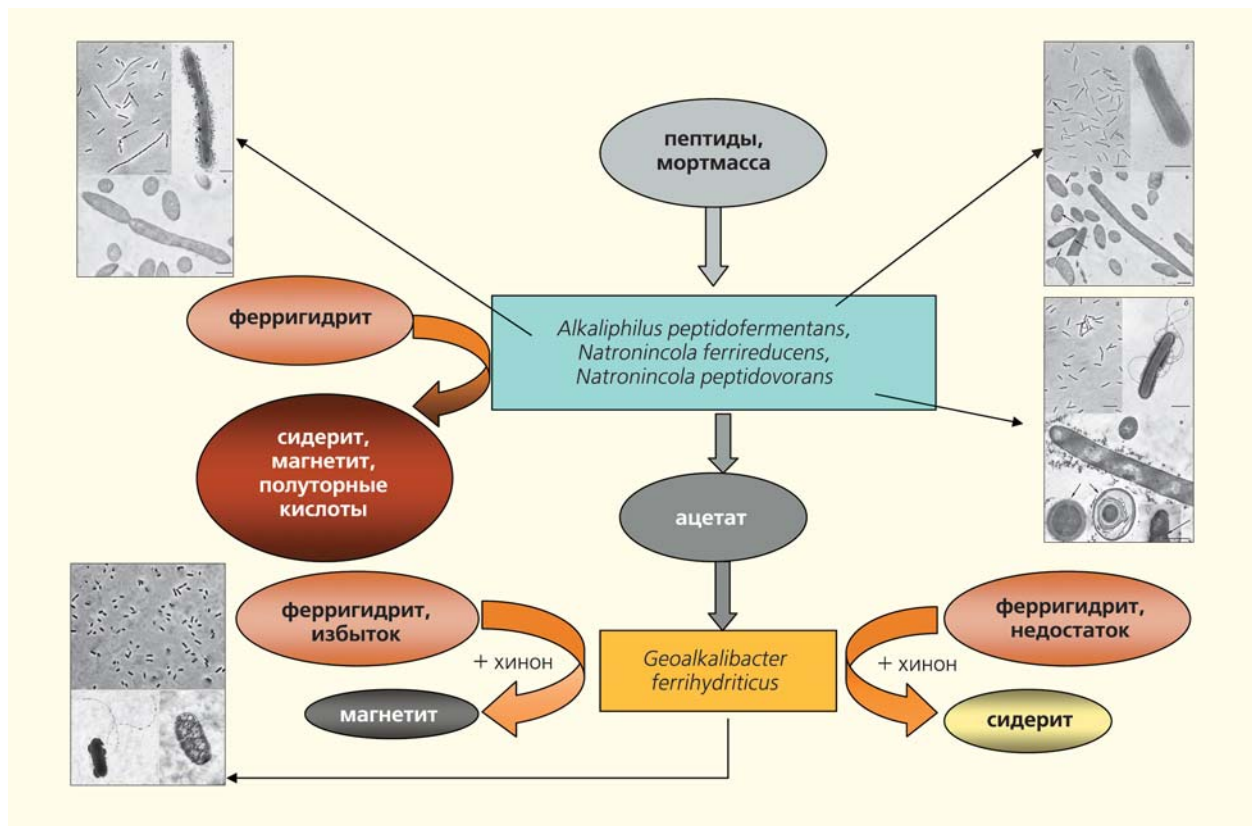


Восстановление ферригидрита за счет окисления ацетата или водорода диссимиляторными железоредукторами в разных содовых озерах при pH 9.5.

Еще один веский аргумент в пользу участия биоты в образовании железистых кварцитов — доказанная в 1997 г. Ф.Видделем способность аноксигенных фототрофов окислять двухвалентное железо [16]. Это открытие позволило объяснить, откуда



Микрофотографии минералов: слева — осадок ферригидрита в контроле; в середине — сидерит, образованный *Geoalkalibacter ferrihydriticus* при недостатке ферригидрита; справа — магнетит, образованный *G. ferrihydriticus* при его избытке.



Пути восстановления аморфной гидроокиси железа при pH 9.5. Слева и справа — микрофотографии бактерий, участвующих в восстановлении.

при дефиците окислителей в архее — раннем протерозое могло взяться столько окисного железа.

Итак, доминирование цикла железа на протяжении всего этого времени — факт общепризнанный. Ответственные за биогеохимический цикл железа аноксигенные фототрофы и диссимиляторные железоредукторы могли играть определяющую роль на заключительных этапах разложения органического вещества при редуцированном или подавленном цикле серы. Но вправе ли мы делать подобные предположения в отношении сообществ содовых озер, где железо из-за ничтожной растворимости в щелочной среде находится в нерастворимом виде? Можно ли доказать присутствие железоредукторов в таких жестких условиях на фоне современного абсолютного преобладания цикла серы?

Опосредованное восстановление железа алкалофильной бактерией *Tindallia magadiensis* впервые установлено в нашей лаборатории [6]. Железоредукцию растворимых комплексов железа осуществляла и бактерия *Alkaliphilus metalliredigens* [17]. В присутствии пептона восстанавливала нерастворимые гидроокислы железа и цитрат железа и термоалкалофильная хемоорганотрофная бактерия *Anaerobranca californiensis* [5]. Однако вопрос о существовании диссимиляторных желе-

зоредукторов, способных замкнуть цикл углерода в алкалофильном сообществе, восстанавливая нерастворимые соединения железа и используя при этом водород или ацетат, оставался открытым.

Ответить на этом вопрос нам помогло изучение проб из донных отложений содовых озер. Магади (Кения), Хадын (Тува), Танатары (Алтай) и некоторых других. Специальным методом удалось определить численность железоредукторов в этих пробах. Были получены накопительные культуры на средах с водородом или ацетатом, из которых был исключен сульфат, но добавлен синтезированный ферригидрит. Оказалось, что диссимиляторные железоредукторы есть во всех исследованных озерах и их деятельность приводила к окислению ацетата или водорода и образованию магнетита или сидерита как восстановленных минеральных фаз. Численность бактерий колебалась от  $10^3$  до  $10^6$  клеток/г осадка [7], что свидетельствует об устойчивости этой группы.

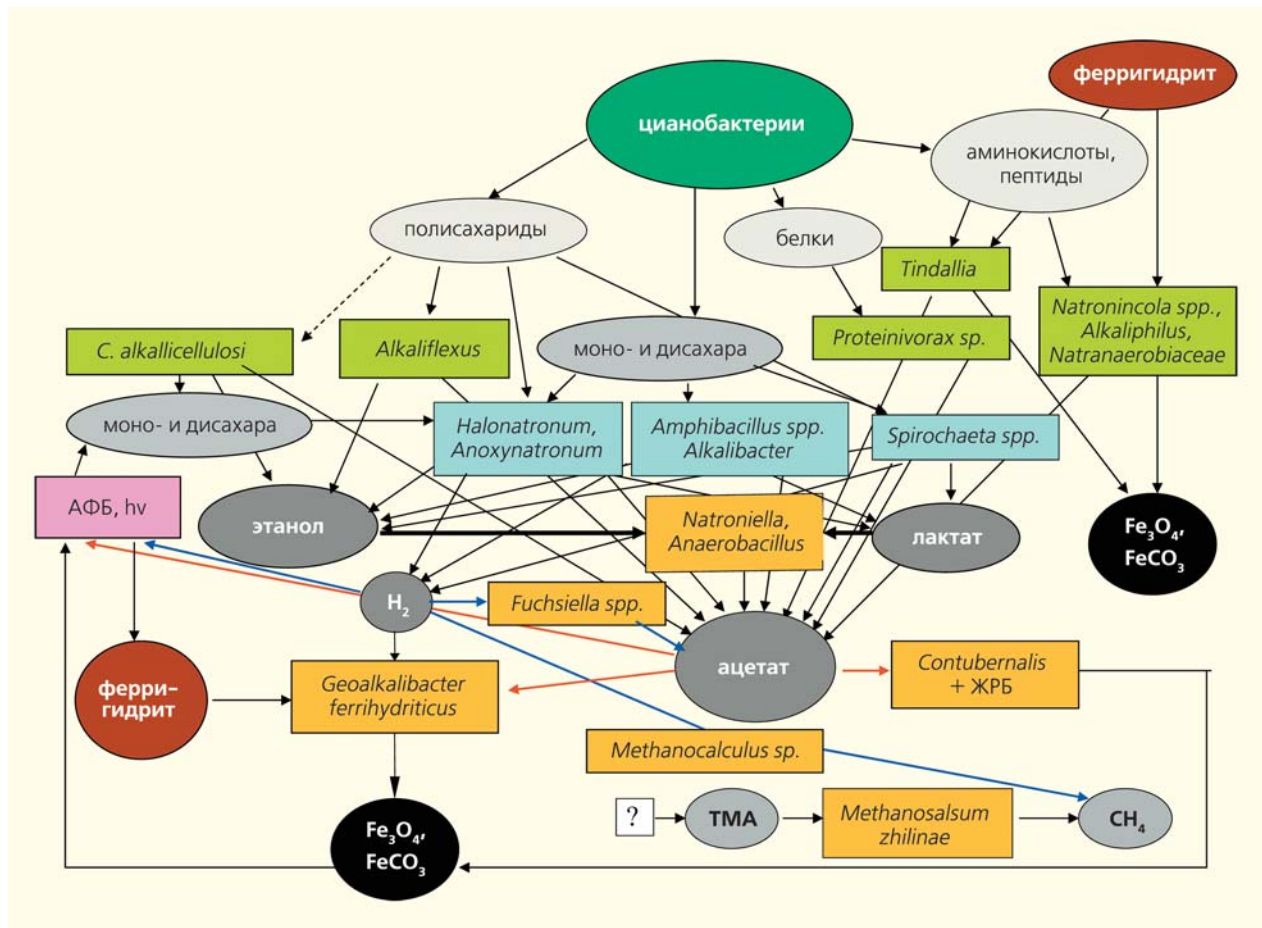
В дальнейшем удалось выделить ряд алкалофильных железоредукторов как диссимиляторных (*Geoalkalibacter ferrihydriticus*), так и восстанавливающих железо при облегченном брожении (*Alkaliphilus peptidofermentans*, *Natronincola ferrireducens*) [7], когда электроны, образующиеся при сбраживании пептидов или сахаров, опосредо-

ванно восстанавливают ферригидрит. Характерно, что *G. ferrihydriticus* в качестве акцептора электронов (помимо железа) мог использовать элементную серу, что позволяет ему существовать и при доминировании цикла серы.

В наших экспериментах магнетит ( $Fe_3O_4$ ) откладывался в щелочных условиях при избытке ферригидрита. Но если его концентрация была недостаточной по сравнению с органическими субстратами, образовывался карбонат железа сидерит ( $FeCO_3$ ). Железистые кварциты, как и другие месторождения, формируются вследствие исключительных совпадений, которые способствуют накоплению, а не рассеиванию железа. Количество любого элемента в рассеянном состоянии всегда намного выше его содержания в месторождениях. Полученные экспериментальные данные говорят, что основной минерал, образующийся при восстановлении ферригидрита в природных условиях, скорее всего не магнетит, а сидерит. Появление магнетита можно рассматривать либо как лабораторный артефакт, либо как уникальное природное явление, требующее редкого сочетания физико-химических факторов, которое тем не менее нельзя признать невозможным.

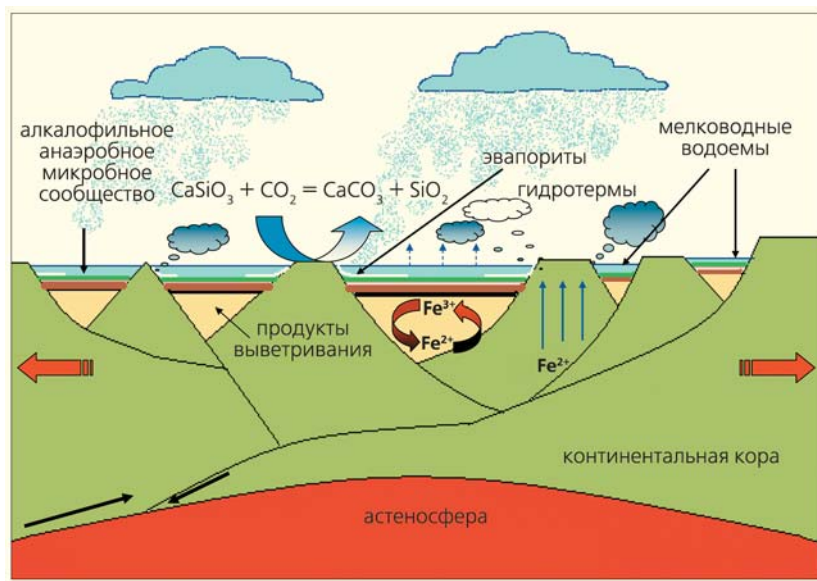
### Возможная реконструкция

Энергетически восстановление железа — один из самых выгодных анаэробных процессов, и в случае конкуренции за субстрат железоредукторы опережают и сульфатредукторов, и метаногенов, и ацетогенов. Кроме того, присутствие ферригидрита ингибирует сульфатредукцию [17]. С другой стороны, согласно недавним исследованиям, наличие серных соединений, таких как тиосульфат (в низких концентрациях), позволяет некоторым сероредукторам восстанавливать ферригидрит, используя тиосульфат как переносчик электронов [18]. Учитывая эти данные, можно предположить, что низкие концентрации серных соединений в докембрийских водоемах не только не препятствовали развитию железоредукторов, но и позволяли вторичным анаэробам серного цикла использовать ферригидрит в качестве акцептора электронов. Если же вместо серного цикла в древних содовых озерах действовал цикл железа, функцию его рециклинга (как и в случае серного цикла в современных водоемах), могли взять на себя аноксигенные фототрофы, хотя их участие в таком процессе в содовых озерах требует доказательств.



Реконструкция трофических взаимодействий в автономном алкалофильном сообществе при доминировании цикла железа.





Предполагаемый экотоп, существовавший на палеоконтинентах в архее-протерозое. В основе схемы модель континентального рифтогенеза Б.Вернике (1981). В понижениях образуются эвапоритовые водоемы щелочного типа, возникающие под воздействием атмосферного гидрологического цикла, который ведет к углекислотному выщелачиванию горных пород. Гидротермы служат источником железа, вовлекаемого содовым сообществом в микробный цикл этого элемента.

Рассматривая современное анаэробное алкалофильное сообщество как аналог внутриконтинентальной микробиоты докембрия, мы опираемся на тот факт, что сегодня в содовых озерах имеются все необходимые компоненты, обеспечивающие его длительное и устойчивое существование во времени. Это:

- продукционные и деструкционные группы трофической цепи, осуществляющие круговорот органического углерода;
- способные к азотфиксации цианобактерии, и замкнутость цикла азота (т.е. обеспеченность микроорганизмов этим важнейшим биогенным элементом);
- значительное содержание фосфора, способствующее их высокой продуктивности;
- приспособленность алкалофильных микроорганизмов к стрессовым воздействиям (высушиванию или вымораживанию) и повсеместное распространение при исчезновении эфемерных водоемов.

На основании полученных данных мы можем попытаться представить картину трофических взаимодействий в анаэробном микробном сообществе в условиях преобладания цикла железа. В этом случае ключевым акцептором на последнем этапе разложения органического вещества будет ферригидрит, который в зависимости от условий восстанавливается либо в магнетит, либо в сидерит. Этот процесс может начинаться уже на этапе разложения мортмассы цианобактерий,

когда появляются микробы-пептолитики (*Anaerobranca californiensis*, *Alkaliphilus peptidoferrimentans*, *Natronincola ferrireducens*), или осуществляться на заключительном этапе диссимиляторными железоредукторами вроде *G.ferrihydriticus*.

Нет никаких противоречий в предположении, что на древних континентах могли существовать системы, аналогичные наблюдаемым сейчас на Восточно-Африканском рифте, где содовые озера подпитываются геотермальными водами через тонкую континентальную кору. Активная гидротермальная и вулканическая деятельность в сочетании с повышенной концентрацией углекислоты способствовали увеличению скорости выветривания изверженных горных пород, а гидротермальные воды могли служить источником железа.

Условия докембрия способствовали образованию содовых водоемов с подземным геотермальным питанием, отсутствием или редуцированностью цикла серы и преобладанием цикла железа. Функцию вторичных анаэробов по утилизации водорода и ацетата в микробных сообществах этих водоемов выполняли железоредукторы, ацетогены и метаногены. Биогенным восстановленным минералом железа в содовых озерах, вероятно, был сидерит, так как образование магнетита требует исключительных локальных условий с большим избытком ферригидрита. Отвечая на вопрос в заглавии статьи, можно сказать: распространение и разнообразие алкалофильных железоредукторов однозначно указывает, что их присутствие в содовых озерах не случайно. Скорее всего, они — реликты древних микробных сообществ, приспособившихся жить в условиях доминирования цикла серы, но не утративших способности к восстановлению железа.

\* \* \*

Возвращаюсь к эпиграфу статьи. Сомнение и даже раздражение, вызываемое у моего отца, Георгия Александровича Заварзина, общепризнанным тезисом «жизнь вышла из моря», побудило его выдвинуть антитезис: «жизнь появилась на суше». Гипотеза «содового континента» с содовыми озерами в качестве возможных источников первичного микробного разнообразия оказалась необычайно продуктивной и привела к открытию целого мира неизвестных до этого микроорганизмов, живущих на основе тесных трофических связей и су-

ществующих миллионы лет в поистине экстремальных условиях. В последние годы Георгий Александрович, не отказываясь от первичности появления жизни на суше, усомнился в своей гипотезе о содовых озерах как возможных первичных очагах биоразнообразия. Источником этих сомнений стала именно экстремальность жизни этих сообществ. Он предположил, что скорее «нормальные» условия, доминирующие в современных условиях на поверхности Земли, должны были определять развитие первых микробных сообществ, которые впоследствии могли приспосабливаться к экстремальным условиям. Так появились «омброфилы —

обитатели равнин» — последняя концепция Георгия Александровича, которую он не успел детально разработать, но которая получила дальнейшее развитие в лаборатории С.Н.Дедыш. «Возникновение антитезиса требует вопроса. Знание не имеет вопросов. Возникновение антитезиса требует сомнения. Знание не сомневается». Нелегко выдвинуть антитезис общепризнанной гипотезе и успешно подтвердить его. Но не остановиться на этом, а, усомнившись, задать самому себе новый вопрос, чтобы двинуться дальше в познании мира, может только сильный духом настоящий ученый и мыслитель. Таким и был мой отец. ■

**Работа выполнена при финансовой поддержке программы 28 Президиума РАН «Проблемы происхождения жизни и становления биосферы».**

## Литература

1. Заварзин Г.А. Эпиконтинентальные содовые водоемы как предполагаемые реликтовые биотопы формирования наземной биоты // Микробиология. 1993. Т.62. С.789—800.
2. Kettle S., Degens E.T. An early soda ocean? // Chemical Geology. 1985. V.53. P.95—108.
3. Заварзин Г.А. Алкалофильное микробное сообщество // Тр. ИНМИ. 2007. Т.14. С.41—63.
4. Заварзин Г.А., Жилина Т.Н. Содовые озера — природная модель древней биосферы континентов // Природа. 2000. №2. С.45—55.
5. Горленко В.М. Аноксигенные фототрофные бактерии содовых озер // Труды ИНМИ. 2007. Т.14. С.225—258.
6. Жилина Т.Н. Хемотрофные анаэробы микробных сообществ содовых озер. // Труды ИНМИ. 2007. Т.14. С.158—255.
7. Заварзина Д.Г., Жилина Т.Н. Анаэробные сообщества содовых озер как аналоги палеоконтинентальной микробиоты докембрия // Ранняя колонизация суши. Сер. Геобиологические процессы в прошлом. М., 2012. С.69—91.
8. Kevbrin V., Boltyanskaya Y., Zbilina T., et al. *Proteinivorax tanatarense* gen. nov., sp. nov., an anaerobic, haloalkaliphilic, proteolytic bacterium isolated from decaying algal bloom, and proposal of Proteinivoraxaceae fam. nov. // Extremophiles. 2013 (in press).
9. Schink B., Stams A.J.M. Syntrophism among prokaryotes // The Prokaryotes / Ed. M.Dworkin et al. N.Y., 2002.
10. Жилина Т.Н., Заварзина Д.Г. Ацетатная метабиотическая система в анаэробном микробном сообществе содовых озер // Проблемы эволюции биосферы. Сер. Геобиологические процессы в прошлом. М., 2013. С.119—143.
11. Sorokin D.Y., Kuenen J.G., Muyzer G. The microbial sulfur cycle at extremely haloalkaline conditions of soda lakes // Frontiers Microbiol. 2011. V.2. P.1—16.
12. Заварзин Г.А., Жилина Т.Н., Дулов Л.Е. Алкалофильный сульфидогенез на целлюлозе комбинированными культурами // Микробиология. 2008. Т.77. С.472—482.
13. Coleman M.L., Hedrick D.B., Lovley D.R., et al. Reduction of Fe(III) in sediments by sulfate-reducing bacteria // Nature (Letters). 1993. V.361. P.436—438.
14. Vargas M., Kashefi K., Blunt-Harris E.L., Lovley D.R. Microbiological evidence for Fe(III) reduction on early Earth // Nature. 1998. V.395. P.65—67.
15. Bond D.R., Lovley D.R. Reduction of Fe(III) oxide by methanogens in the presence and absence of extracellular quinones // Environ Microbiol. 2002. V.4. P.115—124.
16. Widdel F., Schnell S., Heising S., et al. Ferrous iron oxidation by anoxygenic phototrophic bacteria // Nature. 1993. V.362. P.834—836.
17. Lovley D.R., Holmes D.E., Nevin K.P. Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) Reduction // Advances in Microbial Physiology. 2004. V.49. P.219.
18. Straub K.L., Schink B. Ferrihydrite-dependent growth of *Sulfurospirillum deleyianum* through electron transfer via sulfur cycling // Appl. Environ. Microbiol. 2004. V.70. P.5744—5749.

# Японское (Восточное) море — акватория противоречий

В.В.Глушков,

доктор географических наук

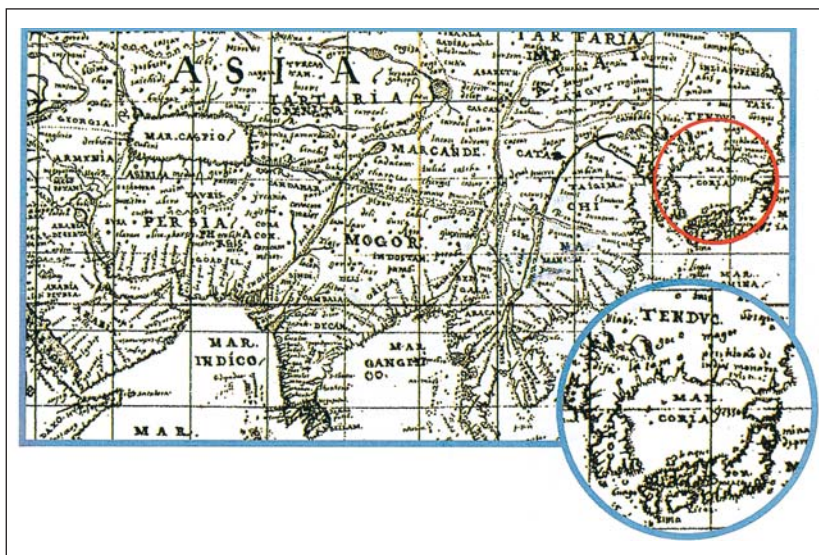
Московский государственный университет путей сообщения

Экономика и вооруженные силы государства — основа его мощи и политического веса в мировом сообществе. Названия же географических объектов — некие знаковые отображения этих характеристик в сознании народов. Поэтому захват агрессором чужих территорий обычно приводил к тому, что исконные названия в одночасье или постепенно заменялись на новые (например, русские, украинские и польские на немецкие, а русские, китайские и корейские на японские и др.). Однако по мере того как некогда грозные державы-завоеватели слабели, названия, как правило, менялись на изначальные\*.

Аналогичная картина наблюдалась и в Азиатско-Тихоокеанском регионе. После того как Япония, потерпевшая сокрушительное поражение во Второй мировой войне, утратила свое былое могущество, японские названия географических объектов, расположенных на территориях, возвращенных Советскому Союзу и Корее, были заменены соответственно на русские и корейские. Однако в послевоенное время камнем преткновения между японской и корейской сторонами стало название лежащего между ними моря. Когда-то оно именовалось Корейским, Восточным, Азиатским, Желтым, Японским и др. [1]. На современных географических



Карта Восточного моря (фрагмент карты Geographical Location of Korea) [3, p.3, 4].



Карта португальца М.Годиньо (1615) [5].

\* Алексеев Б. Станет ли «Японское» море «Восточным»? // <http://zakon-nsk.narod.ru/more.html>



ческих картах мира это море называется по-разному: чаще Японским, реже используется двойное название — Японское (Восточное) или Восточное (Японское), но на корейских картах оно именуется только Восточным (East Sea) [2].

Море по геоморфологическим характеристикам — окраинное, полузамкнутое, омывает берега России, Корейской народно-демократической Республики (Северной Кореи), Республики Корея (Южной Кореи) и Японии. На юге оно сообщается через Корейский пролив с Восточно-Китайским и Желтым морями, на востоке — через Сангарский пролив с Тихим океаном, на севере и северо-востоке через проливы Лаперуза и Невельского — с Охотским морем. Протяженность моря с севера на юг составляет около 2555 км, максимальная ширина 1070 км, площадь 1062 тыс. км<sup>2</sup>, средняя глубина 1536 м.

Название «Корейское море» в Европе впервые появилось на карте португальца М.Годиноу (1615), а затем — англичанина Р.Дадли (1647) [4]. В 1679 г. была издана «Карта Японских островов» француза Ж.Таверньера, а в 1714 — карта англичана Г.Молла и 1752 г. — его соотечественника Э.Бауена. На них упомянутое море названо также Корейским [6, с.45]. В России это название (в написании «Кореское») впервые появилось в 1737 г. на карте Азии, приведенной в «Атласе, сочиненном к пользе и употреблению юношества...», изданном Академии наук и художеств [2, с. 44].

С того времени и до начала XIX в. название «Корейское море» широко использовалось как на российских, так и на зарубежных картах. Так, в 1745 г. той же академией был издан «Атлас России», где имеется и «Карта Азии», на которой показано Море Корейское [2, с.46]. Эта карта основана на российских и иностранных картографических источниках, а также дополнена данными, собранными во время Первой (1725—1730) и Второй (1733—1741) камчатских экспедиций капитан-командора российского флота В.И.Беринга и капитан-лейтенанта А.И.Чирикова [6, р.48].

В 1757 г. была уточнена и издана заново российская карта Азии. Это новое произведение повлияло на содержание многих русских и некоторых иностранных карт, составленных и изданных во второй половине XVIII — начале XIX в. На большинстве из них рассматриваемое море было названо Корейским. В числе таких карт можно упомянуть российскую «капитана Голикова с сотоварищи...» (1787), английскую (1791),



Карта англичанина Р.Дадли (1647).

<http://www.infokorea.ru>

немецкую (1793) [6, р.46, 47], карту Дж.Вилда (1845)\* и др.

Важно отметить, что и японцы в XVIII—XIX вв. называли водное пространство, лежащее между Кореей и Японией, морем Чосон или Чосонским (т.е. Корейским) морем. Об этом свидетельствуют японские «Карта Азии» (1794) картографа Катцурягавы\*\*, «Краткая карта прибрежных морских земель Японии» (1808) географа К.Такахаси и ее усовершенствованный вариант (1853) [7, р.3], «Карта мира» (1871) географа Ё.Мураками [3, р.36].

О море, именуемом «Японским», в Европе стало впервые известно в 1602 г. с выходом в свет «Карты мира», составленной М.Ричи — итальянским католическим миссионером в Пекине. Однако это название распространения не получило. В 1737 г. французский картограф Дж.Б.Б.Д'Анвиль составил новый атлас Китая, в котором упомянутое море было вновь названо Японским. Но и этот почин в цивилизованном мире поддержки не имел — рассматриваемое море по-прежнему называлось либо Корейским, либо Восточным [6, р.45, 46, 49]. Это, видимо, объясняется тем, что островная Япония в силу своей многовековой самоизоляции стала известна европейцам гораздо позднее, чем материковая Корея, поэтому изначальное название разделяющего две страны моря («Корейское») сохранилось, несмотря на то, что в начале XVIII в. авторитет французской картографии в мире был довольно высок [4].

Здесь уместно будет отметить, что в свое время аналогично было названо и Норвежское море,

\* <http://www.infokorea.ru>

\*\* Там же.





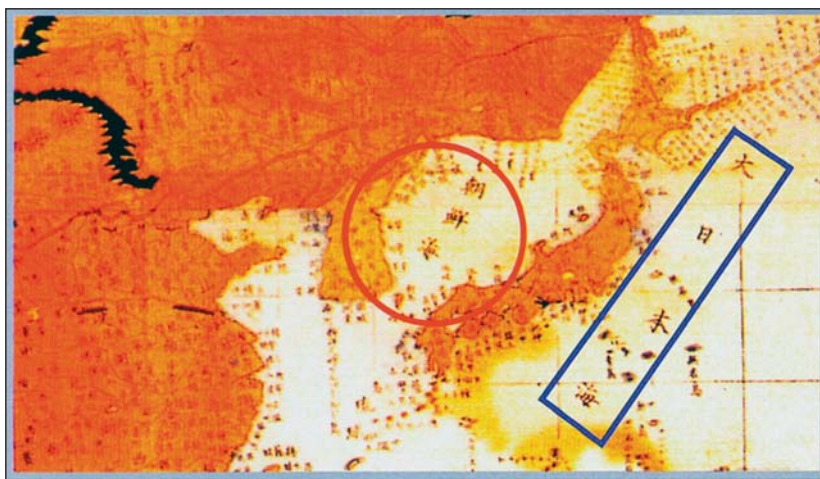
исключительных экономических зон прилегающих стран. Вот если бы это море находилось в пределах того или иного государства, как например Внутреннее японское море, окруженное только японской территорией, тогда бы в правомерности названия «Японское» сомнений не возникало. Поэтому корейцы на своих картах и называют море, лежащее между Корейским п-овом и Японскими о-вами, нейтрально — Восточным.

Этой же точки зрения придерживается и современное мировое научное сообщество, которое считает, что стандартами для географического названия должны служить *история и расположение* [9].

Что касается *истории*, то рассматриваемое водное пространство называлось Восточным морем еще 2000 лет тому назад. Об этом свидетельствует летопись «История трех королевств» короля Тоймён — правителя королевства Когурё\*. В ней в частности отмечается, что название «Восточное море» появилось в 37 г. до н.э. Это название также было высечено на огромной каменной стеле, возведенной на северо-востоке Китая в 414 г. н.э. в память о Квангэтхо — короле Когурё, правившем в 377—413 г. н.э. Название «Восточное море» также увековечено и на древней корейской «Карте восьми провинций», составленной в 1531 г. Название же «Японское море» впервые упоминалось в летописях VIII в. н.э., т.е. на 700 лет позже, чем «Восточное».

Название «Восточное» использовалось европейцами уже в те времена, когда в результате географических открытий XVI в. на картах мира появились первые очертания Корейского п-ова и Японского архипелага. Например, Восточным оно значилось на картах англичан Окела и Глуэра (1694), а также француза Гийома де Лиля (1705). Название же «Японское море», как уже отмечено, появилось на европейских картах значительно позже — в XVII в. [8, с.48].

Что касается *расположения* и связанного с этим названия географического объекта, то здесь уместно будет напомнить, что издавна в мировой географической практике принято называть океаны и моря по сторонам света относительно близлежащей материковой, а не островной части суши. Так, океан, расположенный к се-



«Карта мира» японского географа Ё. Мураками (1871) [3, р.36].

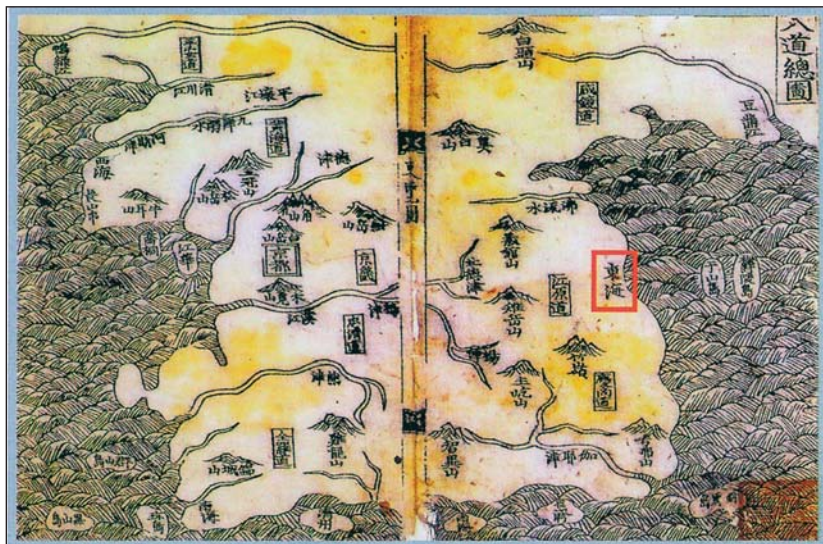
веру от Евразийского материка, был назван Северным Ледовитым, а Тихий океан, омывающий восточную часть Российской империи, именовался на русских картах Восточным морем до XVIII в. и Восточным океаном до XIX в. В конце XX в. на картах мира появилось название «Южный океан». Так было названо водное пространство, простирающееся к югу от Африки, Евразии и Австралии. По такому же принципу названо Северное море, расположенное к северу и северо-западу от материковой Европы. Называть же Северное море, например, Восточным относительно островной Великобритании или же Английским никто не пытался даже в эпоху наивысшего могущества Британской империи [4]. Кстати, англичане некоторое время называли упомянутое море Немецким, но это название не прижилось, поскольку сами немцы называли это море Северным (Nordsee), т.е. расположенным к северу от Германии.

Таким образом, на мой взгляд, море, находящееся к востоку от Корейского п-ова, а точнее — к востоку от Евразийского континента — на географических, навигационных и других картах мира правомерно было бы называть *Восточным морем*. Кстати, так когда-то датчане, шведы и немцы называли Балтийское море, лежащее к востоку от конкретной материковой территории.

Между тем на современных картах преобладает название «Японское море». Это обусловлено рядом причин, и прежде всего не всегда корректными действиями Японии. Так, в конце XIX в. на Международной гидрографической конференции, в которой ни Корея, ни ее соседи не участвовали, японская делегация настояла на принятии резолюции об утверждении единого названия — «Японское море». Это, по некоторым оценкам, соответствовало тогдашнему стремлению Японии заявить о себе на весь мир и в итоге обрести в Азиатско-Тихоокеанском регионе господствующее положение.

\* Когурё — одно из корейских племен, занимавшее к началу I в. н.э. территорию по среднему течению р.Амноккан. Позднее так называлось одного из трех раннефеодальных государств (Когурё, Пэкче, Силла), существовавшего в период 37 г. до н.э. — 668 г. н.э.





Название «Восточное море» на древней корейской «Карте восьми провинций» (1531) [3, p.34].

После окончания Русско-японской войны 1904–1905 гг. Япония, как известно, обрела довольно прочный политический статус, и название «Японское море» получило еще большее признание. Кульминацией стал выход в свет первого издания авторитетного справочника «Границы морей и океанов», настольной книги для океанографов и картографов всего мира. В нем на основании решения, принятого в 1929 г. на конференции Международного гидрографического общества в Монако, было предписано впредь называть рассматриваемое водное пространство не иначе как Японское море. Корея в то время не могла выразить по этому поводу протест, поскольку с 1910 г. находилась под протекторатом Японии, была лишена суверенитета и не имела дипломатического представительства на мировой арене. Более того, в указанный период японцы проводили политику силового подавления корейской культуры. В частности, японцами были предприняты попытки насильственного уничтожения корейского языка — корейцам даже запрещалось разговаривать на родном языке, а исконные, освященные корейские названия, в том числе и названия местных географических объектов, стали заменять японскими [10].

В последующих выпусках справочника «Границы морей и океанов» (1937, 1952) название «Японское море» было также сохранено\*. Однако напомним, что в 1937 г. японские войска оккупировали уже не только Корею, но и Северо-Восточный Китай (Маньчжурию), а в 1952 г. на Тихоокеанском побережье шла братоубийственная Корейская война 1950–1953 гг., и все вопросы, связанные с географическими названиями, временно отошли на второй план.

\* <http://www.infokorea.ru>

В 1965 г. в подписанном договоре о рыболовстве между Республикой Корея и Японией упомянутое море было названо Японским в японском тексте документа и Восточным — в корейском\*\*. Тогда Япония отказалась обсуждать вопрос о переименовании. Однако в 1992 г. на заседании комиссии по стандартизации географических названий ООН корейский представитель заявил протест против общепринятого названия «Японское море», напоминая его соотечественникам унизительное колониальное прошлое их страны (1910–1945) [11].

В том же году южнокорейское правительство провело специальное заседание, на котором к организаторам любых международных мероприятий было выдвинуто требование дублировать «географическое название «Японское море» названием «Восточное море», либо это море не должно никак именоваться и обозначаться нейтрально по географическим координатам». Кроме того, южнокорейское Министерство иностранных дел запретило своим общественным организациям и гражданам страны принимать участие в любых международных форумах и других мероприятиях, в названиях которых будет упомянуто Японское, а не Восточное море\*\*\*.

В 1993 г. представители Республики Корея официально обратились в ООН с предложением переименовать Японское море на одно из предложенных ими названий: «Восточное море», «Дальневосточное море», «море Мира», «Голубое море». Однако это компромиссное предложение успеха не имело.

В 1997 г. на XV Международной гидрографической конференции делегаты Республики Корея выступили с предложением, чтобы в очередное издание справочника «Границы океанов и морей» наряду со старым наименованием «Японское море» было внесено альтернативное название — «Восточное море».

В 1998 г. на VII Конференции ООН по стандартизации географических названий корейцы добились успеха: было принято решение рекомендовать картографическим службам стран всего мира на своих картах называть акваторию Японским (Восточным) морем. Эта рекомендация была принята рядом государств и, в частности, нашла отра-

\*\* Там же.

\*\*\* Южная Корея продолжает настаивать на переименовании Японского моря // <http://novostivl.ru/forum/msg/10243.htm#>

жение в Британской энциклопедии, а также на новых географических картах крупнейшего картографического издательства США «Rand McNally».

В 2002 г. Международная гидрографическая организация приняла решение не упоминать в новом издании справочника «Границы океанов и морей» это водное пространство с прежним названием. Более того, она разрешила всем картографам именовать эту акваторию Мирового океана по своему усмотрению либо использовать термин «Японское/Восточное море»\*. На это решение японцы ответили протестом, утверждая, что требования корейцев «не имеют под собой никаких оснований».

В том же году в Берлине состоялась Конференция ООН по унификации географических названий, на которой присутствовало более 200 экспертов со всего мира. На конференции рассматривались вопросы, связанные с приведением «к общему знаменателю» географических наименований, которые звучат в различных странах по-разному. Как и предполагалось, ожесточенный спор вспыхнул по поводу названий «Японское море» и «Восточное море», который вели с одной стороны Япония, а с другой — Республика Корея и КНДР. В том конфликте корейская сторона, представляющая население более 70 млн человек, одержала важную промежуточную победу: Международная гидрографическая организация разослала всем своим членам проект нового варианта справочника, в котором раздел о Японском море отсутствовал. Последнее означало: название упомянутого моря официально признано спорным, поэтому его можно именовать по-иному, в том числе и как Японское/Восточное море [12].

23—27 апреля 2012 г. в штаб-квартире Международной гидрографической организации в Монако состоялась XVIII Международная гидрографическая конференция, на которой вновь решался вопрос о наименовании упомянутого водного пространства. Окончательное решение по спорному вопросу принято не было, но японское предложение «запретить использовать название “Восточное море” на картах и в средствах массовой информации» было отклонено. Переиздание же справочника «Границы океанов и морей», в котором фигурирует исключительно название «Японское море», было отложено на неопределенный срок\*\*.

Конечно, Япония, давно стремящаяся к мировому лидерству, не желает переименовывать Японское море, выдвигая различные аргументы в поддержку своей позиции. Так, японские гео-

графы утверждают, что, поскольку это море отделено от Тихого океана Японским архипелагом, оно должно называться Японским. Между тем, море, отделенное от Атлантического океана Британскими островами, называется Северным, а не Британским.

Даже если следовать японской точке зрения, уместно будет привести размышления А.Азимова — известного американского писателя-фантаста и популяризатора науки: «До прихода европейцев на Дальнем Востоке господствовал Китай. Даже там, где его влияние было политическим, его культурой восхищались и ее усваивали. Себя Китай называл Средним Царством, так как на востоке и западе лежали другие земли. На востоке находилось островное государство [Япония], которое китайцы называли Страна Востока. Жители этого государства согласились с китайской точкой отсчета и также считали себя страной Востока. Впрочем, более чем на 14 тыс. км восточнее нет ни одного крупного государства» [13, с.359]. Итак, поскольку японцы когда-то называли себя жителями Страны Востока, то название «Восточное море», наверное, не должно было бы их раздражать. Надо только им об этом чаще и к месту напоминать.

По-моему, одним из первых шагов на пути к переименованию рассматриваемого моря в его исторически и географически правомерное название («Восточное море») может стать известный с давних времен подход по использованию различных названий одного спорного географического объекта.

Например, уже упомянутое Норвежское море, которое в русских летописях XV в. называли Мурманским, на карте известного фламандского картографа Г.Меркатора, изданной в 1594 г., обозначено Норвежским и Датским, а на карте, изданной в 1612 г. картоиздателем С.Нейгебауэром, — Мурманским, Норвежским и Датским одновременно [1, с.45, 46].

Еще один пример: на картах мира водное пространство, отделяющее о-ов Сахалин от Евразийского материка (пролив Невельского), названо именем русского мореплавателя адмирала Г.И.Невельского, открывшего его в 1849 г. В Японии же оно именуется проливом Мамия в честь землемера и картографа Р.Мамия, который открыл этот пролив в 1808 г. [14]. Однако приоритет в открытии пролива принадлежит все-таки Невельскому, поскольку он оформил свое открытие в соответствии с международным законодательством того времени. Мамия же, в силу самоизоляции Японии от внешнего мира, этого сделать не мог, ибо любая утка картографической информации из Японии и контакты с иностранцами в то время жестоко карались [8, с.50].

Рассмотренный подход «параллельного названия» имеет не только исторические корни — он уже более 30 лет официально принят в качестве

\* Великие географические споры // Общая газета.ru: <http://www.og.ru/articles/2007/01/12/21518.html>

\*\* Заключительный обзор по главным вопросам // <http://russian.korea.net/Government/Current-Affairs/Others/view?affairId=83&subId=236&articleId=1147>

правовой нормы. Впервые она была прописана в «Резолюции о географических названиях Международного гидрографического общества», принятой 13 марта 1974 г. Пункт А 4.2.6. этой резолюции гласит: «В случае если географический объект находится на территории нескольких государств и имеет различные названия, рекомендуется, чтобы эти государства предприняли попытки заключить договор о принятии единого названия. Когда официальные языки государств различны и они не могут принять единое название, рекомендуется, чтобы обозначения, употребляемые каждым из государств, использовались на картах и в публикациях параллельно...». Близкая по содержанию резолюция III/20 («Названия объектов, не принадлежащих одному государству») была принята и на конференции ООН по стандартизации географических названий в 1977 г. Она, в частности, предписывает: «В случае если страны не в состоянии будут прийти к консенсусу относительно названия географического объекта, рас-

положенного на их сопредельной территории, то они должны руководствоваться принципом равного использования всех возможных названий этого объекта...»\*. Следовательно, с точки зрения международного законодательства равноправное употребление терминов «Японское море» и «Восточное море» является вполне допустимым. Среди наиболее известных случаев применения этой резолюции на практике упомянем общепринятые названия: Английский канал/Ла-Манш и Фолклендские о-ва/Мальвинские о-ва.

Что касается России, то для нее название «Восточное море» могло бы стать вполне приемлемым. Ведь в его северной части расположен Владивосток — город «Владеющий Востоком». При переименовании моря это название могло бы наполниться новым, глубоким смыслом. ■

\* Заключительный обзор по главным вопросам // <http://russian.korea.net/Government/Current-Affairs/Others/view?affairId=83&subId=236&articleId=1147>

## Литература

1. Глушков В.В. О переименовании Японского моря // Корея на стыке времен: проблемы истории и современности. Сб. докл. на междунар. конф. «Нерешенные территориальные вопросы Дальнего Востока: Китай, Япония, Корея». М., 2006. С.39—47.
2. Глушков В.В., Постников А.В. Как Корейское море стало Японским, оставаясь Восточным // Геодезисть. 2002. №3. С.42—47.
3. Ocean Atlas of Korea (East Sea). National Oceanographic Research Institute, Republic of Korea. Incheon, 2007.
4. Глушков В.В. Острова Токто в Восточном море // Материалы конф. «Международный порядок в Восточной Азии и острова Токто», Тэгу (Республика Корея). Тэгу, 2006. С.46.
5. East Sea. The Name East Sea Used for Two Millennia. Seoul, 2008.
6. Postnikov A.V., Pospelov E.M. The History of Russian Names for Seas, with the Special Reference on the Development of the Korean (Japanese) Sea Presentation on Maps (Seventeenth through nineteenth centuries) // The Fifth International Seminar on the Naming of Seas: Special Emphasis Concerning the East Sea, Korea. Seoul, 1999. P. 32—65.
7. Legitimacy for Restoring the Name «East Sea». Seoul. 2009.
8. Глушков В.В. Спорные острова в море противоречий: уроки истории географии // Институт истории естествознания и науки им.С.И.Вавилова РАН. Годичная научная конференция. М., 2007. С. 41—55.
9. Пэйнер П. ООН и стандартизация географических названий // Сб. протоколов международного семинара по стандартизации географических названий. Сеул, 1997. С.1—14.
10. Пак Чон Хё. Об острове Токто и о том, как на карте мира появилось «Японское море» // Сб. докладов научной конференции «Некоторые территориальные вопросы на Дальнем Востоке и актуальные задачи международного сотрудничества во имя мира». М., 2006. С.20—21.
11. Ванин Ю.В. Корею необходимо единство (вместо заключения) // Сб. докл. «Некоторые территориальные вопросы на Дальнем Востоке и актуальные задачи международного сотрудничества во имя мира». М., 2006. С.37—39.
12. Карчинский И.А. Географический конфликт // Геодезисть. 2002. №5—6. С.36.
13. Азимов А. Слова на карте. Географические названия и их смысл / Пер. с англ. М., 2006.
14. Хоппо редо-си: Сирехэн (История северных территорий: Сб. документов и материалов на яп. языке). Токио, 1992.



# Глубоководный обитаемый аппарат «Яолонг»

А.М.Сагалеви́ч,  
доктор технических наук  
Институт океанологии им.П.П.Ширцова РАН  
Москва

В 2012 г. в Китае было закончено создание нового глубоководного обитаемого аппарата (ГОА) «Яолонг», рассчитанного на погружения до 7000 м. Обитаемые аппараты, работающие на сверхвысоких глубинах (более 6000 м) не конструировались уже более четверти века. В 80-е годы прошлого столетия создали пять ГОА с рабочей глубиной 6000 м: «Нотиль» (Франция), «Си Клифф» (США), «Шинкай 6.5» (Япония) и «Мир-1 и -2» (СССР, Россия). На них проводились уникальные исследования на гидротермальных полях и в рифтовых зонах океана, подводных поднятиях и абиссали.

Китайский «Яолонг» создан на тех же принципах и на базе тех же технических решений, что были заложены при создании его предшественников. Однако появление нового аппарата способствует дальнейшему проникновению человека в глубины океана. В наш век телеуправляемых и автономных приборов для проведения научных исследований и подводно-технических работ в океане очень важно введение в строй нового обитаемого аппарата. Оно продолжает дело великих Огюста и Жака Пикаров, Анри Делеза, Роберта Балларда и подтверждает слова Жака Ива Кусто: «Никогда ни один робот не заменит человека под водой, ибо самый точный оптический прибор — человеческий глаз, самый совершенный компьютер — человеческий мозг». В том же 2012 г. Дж.Камрон совершил на вновь созданном аппарате «Дип Си Челленджер» сольное погружение (второе в истории) в Марианскую впадину [1].

«Яолонг» продолжает ряд сверхглубоководных обитаемых аппаратов, а на очереди уже следующий — американский «Алвин-2», рассчитанный на глубину 6500 м. Его введение в строй должно состояться в этом году.

Проект, разработанный Кораблестроительным исследовательским центром в Шанхае, представили на рассмотрение в Министерство науки и техники этой страны в 1992 г. Поскольку проект не требовал срочной реализации и был связан с большим риском в техническом плане, обусловленным отсутствием опыта создания глупоководных обитаемых аппаратов в Китае, чиновники его к исполнению не приняли.



Глубоководный обитаемый аппарат «Яолонг».

Фото автора

В 1999 г. Ассоциация освоения океанических минеральных ресурсов Китая заявила о необходимости создания ГОА для выполнения своих обязательств перед правительством по разведке полезных ископаемых на дне океана. И в июне 2002 г. правительство Китая подписало постановление о создании ГОА с рабочей глубиной 7000 м. Ассоциация же была утверждена в качестве координатора работ, а впоследствии и владельца аппарата.

При проектировании аппарата китайские специалисты изучали опыт создания всех обитаемых шеститысячников, введенных в эксплуатацию в 80-х годах XX в. Нужен был малогабаритный, легкий, обладающий высокой маневренностью и большим энергетическим запасом аппарат, который был бы оснащен самым современным научным, навигационным и видеооборудованием, а также широким набором инструментов для отбора образцов на больших глубинах.

При проектировании аппарата китайские специалисты изучали опыт создания всех обитаемых шеститысячников, введенных в эксплуатацию в 80-х годах XX в. Нужен был малогабаритный, легкий, обладающий высокой маневренностью и большим энергетическим запасом аппарат, который был бы оснащен самым современным научным, навигационным и видеооборудованием, а также широким набором инструментов для отбора образцов на больших глубинах.

27 февраля 2003 г. Предварительный проект на создание «Яолонга» представили на рассмотрение Государственной администрации по океану. После его утверждения начались инженерно-технические работы. Сферу из титанового сплава изго-

товили на Балтийском заводе в Санкт-Петербурге. Испытания в ЦНИИ имени академика А.Н.Крылова подтвердили правильность прочностных расчетов, и сферу приняли классификационное общество и будущий владелец. Китайские специалисты не скрывали, что в качестве прототипа были взяты ГОА «Мир», признанные американским Центром развития технологий лучшими среди аппаратов этого класса. Как общее устройство «Яолонга», так и конструкционные особенности отдельных его систем в значительной степени сходны с российскими «Мирами». Похожи и внешние обводы аппаратов.

Однако есть и некоторые различия. К примеру, в балластной системе используется вода, т.е. при погружении происходит ее прием в прочные цистерны, а при всплытии — откачка. Обеспечивает всплытие также и сброс твердого балласта. Такое решение себя оправдало, ибо насос высококого давления, откачивающий водяной балласт, работал лишь до глубины 6000 м. Дифферентовка (регулировка наклона) «Яолонга» осуществляется с помощью ртути, перекачиваемой (как и в аппаратах 60—70-х годов) из кормовой цистерны в носовую и обратно.

В аппаратах «Мир» твердый балласт (никелевая дробь) сбрасывается лишь в аварийных случаях, а дифферент регулируется перекачкой воды из носовых балластных сфер в кормовые и обратно. Такое решение проще, эффективнее и безопаснее при эксплуатации.

В «Яолонге» энергетика обеспечивается серебряно-цинковыми аккумуляторами примерно той же емкости, что и на «Мирах», но никель-кадмиевые аккумуляторы «Миров» рассчитаны на 1200 циклов «заряд—разряд» и подлежат замене через 7—8 лет. Жизнь же серебряно-цинковых аккумуляторов гораздо короче (70—80 циклов). И менять их нужно каждый год, а это очень дорогостоящая процедура. В американском «Си Клиффе» также использовались серебряно-цинковые аккумуляторы, и его вывод из эксплуатации в 1998 г. был в значительной степени связан с дороговизной, определяемой, в частности, и ежегодной заменой аккумуляторов.

Несомненное преимущество ГОА «Яолонг» — современное научное и навигационное оборудование, которое включает компьютерную систему сбора данных с широким набором гидрофизических и гидрохимических датчиков; локатор бокового обзора для исследований микрорельефа аку-

стическими методами; два манипулятора с семью степенями свободы и набор пробоотборников воды, грунта и биологических образцов; одну высококоразрешающую и пять обычных видеокамер. Последние дают возможность записывать научную информацию и получать круговую панораму, что значительно облегчает пилотирование аппарата. Внешнее освещение представляет собой комбинацию матриц жидкокристаллических диодов и мощных галогенно-ртутных светильников. Навигационное оборудование состоит из гидроакустических систем с длинной и ультракороткой базами, оптоволоконного гирокомпаса, доплеровского измерителя скорости аппарата. На «Яолонге» установлено шесть гидролокаторов кругового обзора, которые передают на дисплей круговую панораму выступающих объектов и препятствий на дне. Высокую маневренность аппарата под водой обеспечивают четыре кормовых маршевых движителя, два поворотных боковых и один лагвый в носовой части. Китайский аппарат размером 8.4×4.2×3.0 м весит 22 т. Внутренний диаметр сферы 2.1 м. Энергетический запас аккумуляторов — 110 кВтЧ. Экипаж состоит из трех человек. Для доставки ГОА на место работ было специально оборудовано судно «Ксянгангхонг-09» водоизмещением 4435 т.

Осенью 2007 г. в бассейне проводились первые испытания «Яолонга»: отлаживалась работа систем аппарата, а также проходила тренировка будущих пилотов. Морские испытания ГОА начались весной 2009 г., а закончились той же осенью погружением на глубину, немногим превышающую 1000 м. Летом следующего года уже была достигнута глубина около 3800 м, и это расценивалось как большой успех китайских инженеров и ученых, не имевших опыта глубоководных погружений. В июле-августе 2011 г. «Яолонг» несколько раз погрузился на глубину более 5000 м, одновременно проводя научные исследования в районе с железомарганцевыми конкрециями. Наконец, 30 июня 2012 г. ГОА «Яолонг» достиг глубины 7062 м. Погружение в целом прошло успешно. Тем не менее был выявлен ряд технических недоработок, которые будут устраняться в ближайшее время.

Таким образом, сделан следующий важный шаг в освоении пучин океана. Парк глубоководных обитаемых аппаратов пополнился еще одним техническим средством, позволяющим человеку вести прямые наблюдения в глубоком океане. ■

## Литература

1. Сагалевиц А.М. Глубоководные погружения в Марианскую впадину // Природа. 2012. №11. С.43—50.
2. Cui W.C., Xu Q.N., Liu F. et al. 2009. Design, construction and open water tank test of the deep manned submersible «Harmony» // Keynote paper presented in the Sixth International symposium on underwater technology (UT2009), Wuxi, China, April 2009.
3. Cui W.C., Liu F., Hu Z. et al. On 7000 m sea trials of the manned submersible «JIAOLONG» // MTS Journal. 2013. In Press.
4. Liu F., Cui W.C., Li X.Y. China's first deep manned submersible, Jiaolong // Science. 2010. V.53. P.1407—1410.

# Чарынские каньоны

А.П.Горбунов,

доктор географических наук

Институт мерзлотоведения имени академика П.И.Мельникова СО РАН

Якутск

И.А.Горбунова,

кандидат географических наук

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

В предгорьях северного Тянь-Шаня, на крайнем юго-востоке Казахстана, расположена одна из его главных природных достопримечательностей. Это каньон р.Чарын, по своему облику напоминающий знаменитый Гранд-Каньон в Колорадо.

По свидетельству тюркского филолога Махмуда Кашгари (XI в.), название реки — Чарын — восходит к слову «чарун» (чинара, платан) [1]. Интересно, что именно в ее долине до сих пор произрастает необычный для здешних мест реликтовый ясень, внешний облик и тип кроны которого действительно напоминают чинару.

Есть и другие толкования топонима Чарын. Например, по-киргизски «шар» — река с быстрым течением, не встречающая преграды. Другое киргизское слово, «чар», означает разноросье по берегу реки. Но и быстрые реки, и разнообразная древесная растительность по их берегам широко распространены в горах Тянь-Шаня, а вот произрастание ясеня в здешних местах — уникальный случай. Поэтому первое объяснение кажется наиболее вероятным.

Не так давно в официальных источниках Чарын стал называться Шарыном. Река была переименована без учета исторических свидетельств и вопреки географической и лингвистической логике: еще в 1963 г. основоположник топонимии Казахстана Г.К.Конкашпаев отметил, что название Чарын восходит к древнему уйгурскому наименованию ясеня [2].

Река Чарын (42°40′—44°00′с.ш., 78°30′—80°35′в.д.) — левый приток р.Или — принадлежит бассейну оз.Балхаш. Длина Чарына около 427 км, площадь водосбора — 7720 км<sup>2</sup>, средний годовой расход воды — 37 м<sup>3</sup>/с. Это самая длинная и многоводная река среди всех казахстанских притоков р.Или. А под каньоном обычно понимают несколько наиболее примечательных участков чарынской долины — урочища Сарытугай, Мойнтугай, Куртугай и Акутугай, а также крупный овраг, именуемый Долиной Замков.

Чарын берет начало в южном предгорье хребта Кетмень и в истоках носит имя Шалкудысу. Ниже

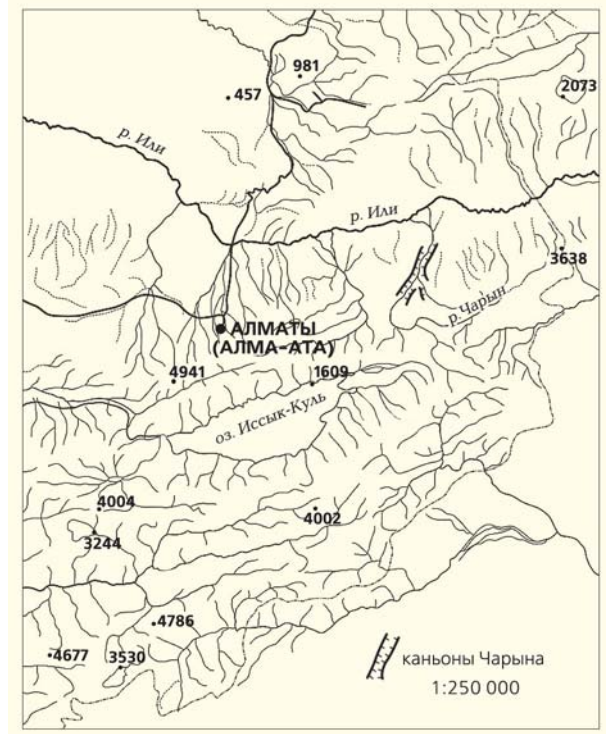


Схема расположения Чарынских каньонов.

по течению, недалеко от соленого озера Тузколь, ее воды поглощаются рыхлыми отложениями. Еще ниже многочисленные родники вновь рожают реку. Здесь она получает другое название, Кеген, и принимает слева крупнейший приток — р.Каркару (чей исток находится в горах Терской-Ала-Тоо). После слияния с еще одним левым притоком — Кенсу — река уже называется Чарыном. Первые левые притоки Чарына — Кенсу, Орта-Мерке и Чет-Мерке (Шет-Мерке) начинаются в горах Кюнгей-Ала-Тоо. Истоки последнего и единственного правого притока Чарына — р.Темирлик — находятся в западных отрогах Кетменя. Длина Темирлика около 60 км, среднегодовой расход в верховье близок к 2 м<sup>3</sup>/с. Питается река атмосферными осадками, а также талыми и подземными водами. Темирлик глубоко врезается в предгорную равнину Кет-



Каньон р.Темирлик. <http://track.kz/sharin.html>

меня и на протяжении 25 км течет в каньоне. Он не такой глубокий, как каньоны Чарына (особенно в урочищах Актугай и Мойнтугай), и склоны его не столь круты и обрывисты, на них даже частично сохранился растительный покров.

При впадении в р.Или Чарын образует обширную дельту. Ее вершина находится примерно в 8 км южнее поселков Чарын и Ташкарасу. Длина дельты почти 25 км, максимальная ширина примерно такая же, общая площадь не менее 500 км<sup>2</sup>. Дельтовая равнина покрыта небольшими озерами и мелководными протоками, которые постепенно зарастают влаголюбивыми травами. В ос-

тальном это глинистая кустарниковая пустыня. В нижней части дельты, непосредственно у берега Или, находится крупное озеро с необычным названием — Деревянное. Его длина около 1 км, наибольшая ширина порядка 0.5 км. Водоем образовался 50—60 лет назад в результате сброса вод из оросительных систем. Озеро проточное, поэтому пресное. У его северо-восточного берега растут деревья, и именно им озеро обязано своим названием. Северо-западный участок дельты занимают барханные пески пустыни Карабаскум, опасно надвигающейся на озеро. В этих песках снимались некоторые фрагменты знаменитого кинофильма «Белое солнце пустыни» (1970).

В последние годы Чарын пополняется главным образом за счет дождей, таяния снега и подземных (родниковых) вод. Но так было не всегда. В 1955 г. в горах бассейна р.Каркары, левого притока Чарына, еще сохранились 11 небольших ледников, питающих реку. Несколько лет назад их оставалось три. Ныне они исчезли, и ледникового питания у Чарына уже нет.

Цепочка глубоких врезов Чарына начинается от устья Кенсу и протягивается примерно на 80 км. Абсолютная высота днища долины у начала каньонов 1700 м, у их конца — 650 м.

На «каньонном» отрезке Чарына облик долины меняется. В верхней части этого отрезка, несколько выше устья Чет-Мерке (в месте сочленения отрога Кет-



Песчаные барханы в дельте Чарына.

Здесь и далее фото А.П.Горбунова (кроме специально отмеченных)

меня с Кюнгей-Ала-Тоо), река течет в скалистом ущелье, глубина которого местами достигает 300 м. Это урочище Мойнак (с казахского — «перешеек»). Склоны здесь крутые, местами отвесные, иногда даже угрожающе нависают над бурной рекой. Сложены они вулканическими породами нижнего карбона (каменноугольного периода палеозойской эры). Их возраст — около 350 млн лет. Водный поток занимает все днище ущелья. А в расщелинах скал каньона на затененных и увлажненных водными брызгами склонах растут тяньшанские ели (ели Шренка). Это ущелье ныне перегорожено плотиной Мойнакской ГЭС.

Ниже устья Чет-Мерке Чарын выходит на просторы Жаланашской впадины, где образует три урочища-каньона — Актугай, Жылысай и Куртугай. В начале неогена (в миоцене) здесь было много озер. К его концу и в раннечетвертичное время климат изменился, наступило похолодание и в горах стали появляться ледники. Полноводные реки начали выносить в Жаланашскую впадину песчано-каменистый материал. Формировались конгломераты.

**Актугай-Жылысайский каньон** располагается в верхней части Жаланашской впадины и имеет два названия: по левобережью — Актугай (с казахского — «светлый лес»), а по правобережью — Жылысай («теплая балка»). Актугай-Жылысай протягивается примерно на 20 км. Здесь река врывается (на глубину 150—200 м) в кайнозойскую рыхлообломочную толщу, которая состоит в основном из пролювиально-аллювиальных наносов неогена, переслаивающихся озерными отложениями. Неогеновая толща перекрыта нижнечетвертичными аллювиальными валунно-галечниками (самые крупные валуны достигают 0,5 м в диаметре), на поверхности которых залегают лёссы того же возраста.

Актугай-Жылысайский каньон заметно шире, чем в верховьях реки, его склоны положе (их уклон около 70°). Русло занимает здесь не все днище, а только его часть. В каньоне хорошо выражены речные террасы и пойма. Вдоль водотока растут ива, тополь, лох (джида) и различные кустарники. Вместе они об-



Каньон Чарына в урочище Куртугай. На заднем плане — бедленд.

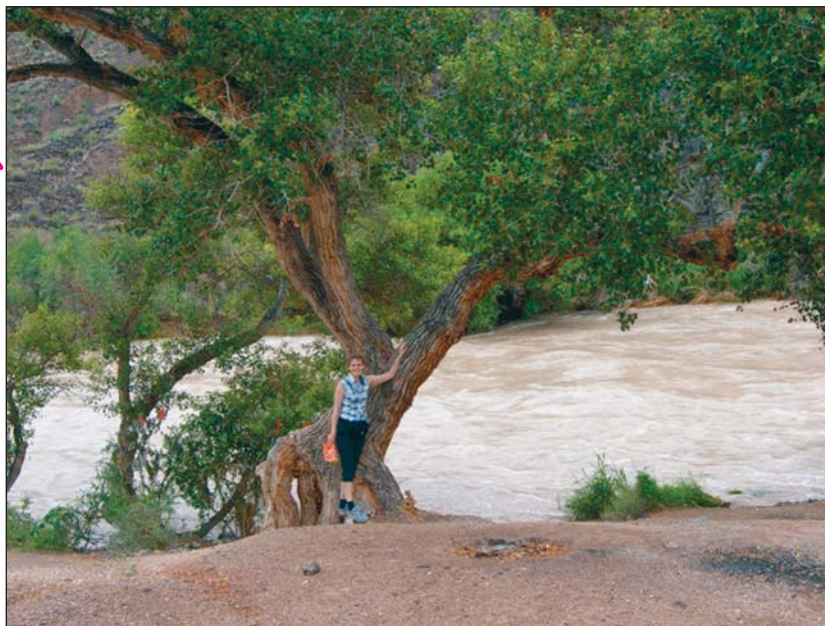
разуют ленточный лесок. Казахстанский геолог Б.Ж.Аубекеров несколько лет назад нашел здесь примитивные каменные орудия, изготовленные человеком каменного века 500—700 тыс. лет назад. Это одна из самых древних находок такого рода на территории Казахстана. Кроме того, здесь обнаружены многочисленные артефакты бронзового и железного веков.

Кайнозойские отложения Жаланашской впадины содержат многочисленные останки древних животных: мастодонтов, южного и трогонтериевого слонов, мамонтов, двурогих носорогов, большерогого бизона, древних лошадей, ископаемых



Живая тектоника: палеозойский блок (слева) надвинут на кайнозойские отложения.





Туранга (тополь разнолистный) на берегу р.Чарын.

верблюдов, маралов и архаров, страусов и многочисленных грызунов. Особенно следует отметить трогонтериевого слона — он жил здесь примерно 200 тыс. лет назад. Это самый крупный из всех слонов (и даже значительно крупнее мамонта).

**Каньон Куртугай** начинается ниже современного моста через Чарын на автомобильной трассе Алматы—Нарынкол. В основании его левого борта под кайнозойской толщей обнаружены темно-серые карбоновые известняки (возрастом



Долина Замков каньона р.Чарын.

Фото А.П.Кузнецова

порядка 300 млн лет). Они насыщены окаменевшими раковинами брахиопод (донных морских моллюсков). Видимая толщина этого горизонта — несколько метров.

На древних известняках залегает неогеновая свита (мощностью несколько десятков метров), состоящая из озерных и пролювиальных отложений. Первые представляют собой известняки, мергели и глины. Вторые — пролювиальные — это несортированные сцементированные глинистые, песчанистые и щебнистые отложения (так называемые паттумы). Вся неогеновая толща окрашена в красноватые и желтоватые тона. Самый верхний горизонт представлен серыми сцементированными галечниками (конгломератами) раннечетвертичного возраста.

По составу и возрасту отложений можно определить, что около 300 млн лет назад на этом месте плескалось теплое море (на это указывают палеозойские известняки с брахиоподами). А позднее, в неогене, на протяжении примерно 23 млн лет преобладал засушливый субтропический климат и господствовали ландшафты, напоминающие современные саванны.

С востока к правому борту каньона Куртугай примыкает участок с так называемым бедлендом.

Это густая сеть глубоких (врезанных в кайнозойскую толщу) оврагов с очень крутыми, часто обрывистыми склонами. Вододелы оврагов — острые непроходимые гребни. Бедленд практически лишен почвенно-растительного покрова.

Немного ниже по течению урочище Куртугай резко меняет свой облик. Река покидает Жаланащскую впадину и врезается в восточный отрог хребта Торайгыр. Здесь она течет в скалистом ущелье глубиной до 300 м. По склонам его обнажаются палеозойские (каменноугольные) вулканические породы, а днище полностью занято водным потоком. В том месте, где река проникает в скальный массив Торайгыра, по правому борту каньона обнажается контакт палеозойских пород с рыхлообломочной толщей кай-



нозоя. Тектоническая структура каньона впечатляет — это взброс скального блока по отношению к кайнозойским отложениям: горизонтальные слои последних на контакте изгибаются кверху, что свидетельствует об активном поднятии Торайгыра.

Скалистое ущелье протягивается примерно на 8 км. Из него Чарын попадает на просторы Илийской впадины и снова глубоко врежется в кайнозойские отложения.

**Каньон Мойнтугай** простирается от выхода Чарына из ущелья, прорезанного в отроге Торайгыра, до устья Темирлика. Это узкий каньон шириной 200—300 м. Здесь ленточками вдоль берегов реки протягивается тугайный лесок\*. Наиболее заметное дерево — тополь разнолистный, по-местному — туранга. Ствол у него толстый, корявый и часто дуплистый. Свообразны и листья: на молодых побегах они узкие и длинные, а на ветках старой части кроны — округлые, крупнозубчатые. Туранга растет и вдали от реки, иногда даже в песчаной пустыне. Кроме нее в тугаях широко распространены ивы и различные кустарники. Их заросли перевиты ломоносом и вьюнком. Изредка встречается клен Семенова. У этого вида листья мелкие, хотя по форме они такие же, как и у многих других кленов.

В месте выхода из Торайгыра в Чарын слева (с запада) открывается грандиозный овраг (сай) Долина Замков. По его бортам процессы выветривания, временные водные потоки, сильные ветры изваяли причудливые скалы, напоминающие развалины древних замков, фигуры людей и животных. Неогеновые паттумы Долины Замков содержат много щебня — продукта разрушения пород северного макросклона Торайгыра. Обращают на себя внимание и беле-

\* Тугайные леса (тугаи) — специфическая мини-экосистема, возникающая по берегам рек (например, Сырдарья, Амударья, Или) умеренных или субтропических пустынь, а также сухих степей Евразии. Ширина такого леса обычно невелика — всего лишь пара десятков метров от кромки воды по обоим берегам реки.



Ясеновая роща в урочище Сарытугай.

дые линзы озерных отложений, в основном мергелей (глинисто-известковой породы).

В Долине Замков неогеновые отложения перекрывают скальный мелкосопочник, сложенный эффузивами (вулканическими породами) верхнего палеозоя (карбона). Эти темные скальные породы хорошо видны по правому борту сая, особенно в месте его выхода к Чарыну, где глубина каньона достигает 200 м. На дне оврага произрастают деревья и кустарники пустынь — саксаул,



«Поцелуй» каменных исполинов в Долине Замков.

Фото А.П.Кузнецова



Саксаул на пустынном склоне каньона.

Фото А.П.Кузнецова

чингиль (на местном языке — шенгель), карагана (караган), эфедра (кылша), а также курчавка (түйесинир) — колючий низкорослый кустарник с мелкими листьями. Весной его бело-розовые цветочки источают сильный медовый запах. По берегам Чарына встречаются туранга, ива, лох, клен Семенова и многочисленные кустарники — барбарис илийский (сарыагаш), таволга (тобылгы), жимолость (ушкат), тамариск, или гребенщик (жынгыл), шиповник (итмурын) и др.

**Каньон Сарытугай** (длиной порядка 25 км) — самый широкий (местами до 2 км) в долине Чарына при глубине не более 100 м. Здесь растет ясень реколюбивый (часто его именуют согдийским или согдианским, а иногда — чарынским).

## Литература

1. *Каишари М.* Диван Лугат ат-Турк / Перевод с арабского и комментарии З.-А.М.Ауэзовой. Алматы, 2005.
2. *Конкаштаев Г.К.* Словарь казахских географических названий. Алма-Ата, 1963.

Этот вид был впервые обнаружен П.П.Семеновым-Тян-Шанским в 1857 г. на берегах Или. Это довольно солестойкое дерево достигает 25 м в высоту и 1.5 м в диаметре (в 1952 г. здесь был встречен необычно крупный экземпляр — высотой 35 м и диаметром ствола 2.85 м). Ясени-долгожители достигают 300-летнего возраста. Кора деревьев светло-серая, ветви красновато-коричневые, а листья весьма длинные — до 20 см. У ясени реколюбивого очень ценная древесина. Это и его достоинство, и его беда. Площадь ясеневоего леса в Сарытугае в 1926 г. составляла около 1100 га, в 1943 г. — всего 410 га. Много деревьев было вырублено в годы войны: древесина ясени шла, в частности, на изготовление лож автоматов. Ныне площадь ясеневоего леса увеличилась до 812 га. Он взят под охрану.

Кроме ясени в Сарытугае произрастают различные кустарники и деревья. Среди них обращают на себя внимание туранга и джида, которая представлена крупными кустарниками, чаще деревьями высотой обычно около 5—10 м. Своими белесыми листочками она напоминает иву. Но только джида — дерево колючее, близкий родственник облепихи (оба относятся к одному семейству лоховых). В тугаях встречаются ива (несколько видов), облепиха, барбарис, тамариск, таволга. На сухих склонах каньона растут белый саксаул и эфедра. Из травянистых растений — чий, ферула, солодка, тростник, осоки и др. В ясеневых массивах травянистый покров обычно беден, а местами отсутствует вовсе.

К югу от ясеневой роши каньон становится шире, он врзается в неогеновые и четвертичные отложения на глубину около 100 м. По мере приближения к р.Или долина теряет выразительность, примерно в 40 км после выхода из гор ее крутые склоны сходят на нет. Цепочка Чарынских каньонов заканчивается.

В 2004 г. в этих неповторимых местах организован Чарынский государственный национальный природный парк Республики Казахстан. Целью его создания стала охрана каньонов Чарына и реликтовых ясеневых лесов в его долине. Благодаря деятельности национального парка сегодня удастся поддерживать уникальную экосистему Чарына в практически первозданном виде и сохранить ее для будущих поколений. ■





## *Конгресс Федерации европейских биохимических обществ 2013 «Биологические механизмы»*

В Санкт-Петербурге с 6 по 11 июля 2013 г. прошел очередной (38-й) конгресс Федерации европейских биохимических обществ (Federation of European Biochemical Societies, FEBS). На это очень крупное научное мероприятие съехалось более трех тысяч биохимиков со всего мира, и в их числе немало выдающихся ученых. Достаточно сказать, что в программе конгресса — пленарные лекции лауреатов Нобелевской премии разных лет: Ж.-М.Лена (1987), С.Тонегавы (1987), Р.Хубера (1988), Р.Робертса (1993), Дж.Э.Уокера (1997), К.Вютриха (2002), А.Чехановера (2004), Р.Дж.Корнберга (2006), А.Э.Йонат (2009), Д.У.Шостака (2009), Ж.А.Хоффмана (2011).

Организацией конгресса FEBS-2013 занималось Российское общество биохимиков и молекулярных биологов, которое возглавляет член-корреспондент РАН А.Г.Габибов, заместитель директора и руководитель лаборатории биокатализа Института биорганической химии им.М.М.Шемякина и Ю.А.Овчинникова РАН. После окончания конгресса, уже в Москве, Александр Габибович ответил на вопросы нашего специального корреспондента А.С.Паевского.



А.Г. Габибов

© Габибов А.Г., 2013





Нобелевский лауреат по физиологии или медицине 1993 г. Ричард Робертс.

Здесь и далее фото А.С.Паевского

### **Александр Габирович, как я понимаю, нынешний конгресс FEBS — не первый в нашей стране?**

Вы совершенно правы, первый состоялся почти 30 лет назад, в 1984 г. в Москве. Это был 16-й конгресс FEBS, а организовал его тогдашний вице-президент АН СССР, а с 1984 г. и президент FEBS, Юрий Анатольевич Овчинников, чье имя носит наш институт. Открытие проходило в Кремле, и тот конгресс — один из самых успешных в истории FEBS, в нем участвовали такие знаковые фигуры науки 20-го столетия, как Лайнус Полинг\* и Дороти Ходжкин\*\*.

\* Лайнус Карл Полинг — американский химик, кристаллограф, лауреат двух Нобелевских премий (1954 и 1962 гг.), один из основателей молекулярной биологии. Он определил природу химической связи, открыл основные элементы вторичной структуры белка, а также первым связал генетическое заболевание (серповидно-клеточную анемию) с мутацией специфического белка. — *Примеч. ред.*

\*\* Дороти Мэри Кроуфут-Ходжкин — английский биохимик, в 1964 г. удостоена Нобелевской премии по химии «за определение структур биологически активных веществ с помощью рентгеновский лучей». — *Примеч. ред.*

Основана Федерация европейских биохимических обществ почти полвека назад, в 1964 г. Сейчас эта довольно мощная международная научная организация включает более 36 тыс. членов, представляющих 35 национальных биохимических и молекулярно-биологических обществ Европы. Иными словами, объединяет практически все европейские страны, где занимаются тем, что принято называть «life sciences» (науками о живом). Конечно среди них есть сильные — такие, как Франция, Германия, Швейцария и т.д., есть и существенно слабее — например, Хорватия, Сербия, некоторые страны СНГ. Тем не менее, на ежегодных ассамблеях FEBS все страны в лице своих официальных представителей имеют равные права голоса.

В FEBS не попадают автоматически. Туда нужно вступать, платить некий взнос и составлять ежегодные отчеты о работе национальных обществ. Основная деятельность FEBS — не только проведение конгрессов, но и распределение на конкурсной основе стипендий молодым ученым. Организация помогает странам, которые находятся не в лучшем финансовом состоянии. В частности, после перестройки в нашу страну FEBS направила достаточно много оборудования, материалов, книг (тогда не так была распространена электронная литература). Была специальная программа «ресайклинга» оборудования — из дорогих и хороших европейских лабораторий отправлялись к нам различные «сэконд хенд» приборы. Есть в FEBS программа отдельных конференций по конкретным научным направлениям, есть программа школ для молодых ученых и студентов в разных областях наук о живом.

Организацией руководит избираемый совет FEBS, в который входят представители европейских стран. Ассамблея состоит из председателей комитетов по разным направлениям работы и представителей каждой страны. Все решения принимаются тайным голосованием. Кстати, очень приятно, что есть и такое направление, как «Наука и общество», которое занято разьяснением роли наук о жизни для человечества. В общем, у федерации обширное поле деятельности. За более подробной информацией можно обратиться на ее сайт [www.febs.org](http://www.febs.org)

### **Как организуются конгрессы? Как часто они проходят? Что нужно, чтобы стать страной-организатором?**

Конгрессы FEBS проходят ежегодно, и они входят в пятерку самых значительных мировых форумов в области наук о живом. Кстати, формально конгрессы биохимические, потом стали писать «биохимия плюс молекулярная биология». Но если посмотреть программы последних конгрессов, то это будет и клеточная биология, и биофизика, и иммунология, т.е. конгрессы вбирают в себя много тем. Тут еще нужно отметить, что FEBS активно сотрудничает с Европейской орга-

низацией по молекулярной биологии (European Molecular Biology Organization, EMBO). Возможно, в будущем эти организации объединятся в связи с финансовыми проблемами в Европе. Кстати, следующий конгресс (2014 г.) в Париже будет уже совместным FEBS—EMBO.

Примерно за три года до предстоящего конгресса начинается подача заявок — и дальше все похоже на работу Олимпийского комитета. Приезжают делегации, смотрят все — и инфраструктуру, и возможные места проведения.

Страна-организатор должна соответствовать нескольким критериям. Во-первых, иметь солидный научный уровень в науках о живом. Во-вторых, национальное биохимическое общество должно быть способным «потянуть» конгресс финансово. В-третьих, в городе, претендующем на проведение конгресса, должна быть подходящая для этих целей площадка — зал на две-три тысячи человек для пленарной сессии и рядом помещения для одновременно проходящих 8—10 симпозиумов. Такое вот классическое единство места — ведь как только заканчивается пленарная сессия, люди расходятся по симпозиумам или идут на постерную сессию. И подобрать такое место достаточно трудно. К примеру, в Санкт-Петербурге мы нашли только одну площадку, удовлетворяющую этим требованиям. В-четвертых, делегация обращает внимание на инфраструктуру города, туристические возможности, гостиничные комплексы, транспорт, аэропорт и т.д. Конечно в этом отношении Санкт-Петербург очень привлекателен.

В организации конгрессов FEBS важно еще одно обстоятельство. FEBS активно сотрудничает с Международным союзом по биохимии и молекулярной биологии (International Union of Biochemistry and Molecular Biology, IUBMB). И когда конгресс IUBMB (а он случается раз в три-четыре года) проходит на территории Европы, он объединяется с конгрессом FEBS. Вот в прошлом году, в Севилье, так и было. Следующий конгресс IUBMB будет в Бразилии в один год с конгрессом FEBS. На самом деле это не очень хорошо, потому что силы «размазываются», и проблему надо как-то решать. Нам в этом смысле повезло — мы не были объединены с IUBMB, и не было параллельного конгресса. И нам удалось собрать масштабный международный форум.

### Какова предыстория конгресса FEBS-2013?

В 2008 г. в новосибирском Академгородке проходил IV съезд Российского общества биохимиков и молекулярных биологов. И там собралось больше тысячи человек — это очень много. Конечно мы пригласили и представителей FEBS (считается хорошим тоном позвать на национальный конгресс коллег из международной организации). К нам приехало около 30 крупных иностранных ученых, в том числе — генеральный секретарь FEBS Израиль Пехт и президент Француз-

ской академии наук Жюль Хоффман\*, который в то время еще не был нобелевским лауреатом. И вот тогда представители FEBS заявили — раз уж вы смогли собрать своих ученых в таком количестве, то, наверное, вам можно доверить и европейский конгресс.

Вообще, хочу сказать, что руководство FEBS устроено двояко. С одной стороны, там есть часто меняющийся президент и вице-президент (например, с января 2014 г. я стану вице-президентом, а через год — президентом), с другой — избираемый раз в пять лет генеральный секретарь, который, как генсек ЦК КПСС в Советском Союзе, руководит всем. Так вот профессор Пехт, очень строгий и требовательный человек, к нам относится хорошо, и его мнение сыграло важную роль в том, чтобы 38-й конгресс FEBS прошел именно в России, в городе на Неве. Правда, место проведения конгресса выбирается в результате голосования в закрытом электронном режиме — все как на выборах столицы Олимпиады.

\* Жюль Альфонс Хоффман — французский иммунолог и цитолог, в 2011 г. получил Нобелевскую премию «за открытия, касающиеся активации врожденного иммунитета». Подробнее см.: Недоспасов С.А. Лауреаты Нобелевской премии 2011 по физиологии или медицине // Природа. 2012. №1. С.114—117. — *Примеч. ред.*



Нобелевский лауреат по химии 2006 г. Роджер Корнберг.





На лекциях.

### Какие основные плюсы у такого огромного форума, как конгресс FEBS?

Я считаю, что у конгрессов FEBS важнейшая миссия — образовательная. И она огромна. Современная наука, несмотря на революционные шаги в области телекоммуникаций, требует непосредственного общения между учеными. Виртуальность, интерактивные беседы не могут заменить реальные дискуссии между участниками круглых столов и семинаров, живое общение между лектором и слушателем. Возможность привезти на конгресс молодежь, которая может увидеть мировых

лидеров науки, послушать их лекции и пообщаться с ними в неформальной обстановке, — один из великих плюсов таких конгрессов. Обычно молодой ученый, ведомый своим руководителем, занимается какой-то узкой областью. Здесь же он приходит на пленарную лекцию нобелевского лауреата и может задать ему любой вопрос, начиная от социального и заканчивая научным, вплоть до мотивационного — например, почему он сменил тематику. Некоторые из выступавших на конгрессе нобелевских лауреатов сейчас занимаются вовсе не тем, за что они получили высшую научную награду. К примеру, С.Тонегава получил в 1987 г. Нобелевскую премию за открытие перегруппировки генов иммуноглобулинов, что объяснило разнообразие белков этого класса. Однако сейчас Тонегава увлечен совершенно другими проблемами — его волнуют вопросы мозга и памяти, и его лекция была посвящена «функциональному» картированию участков мозга.

Конгресс — двуединое мероприятие, и в этом еще одна сложность его организации и дополнительный плюс для его гостей и участников. Нужно





Постерная сессия.

поддерживать высокий уровень и пленарной сессии, и проходящих параллельно симпозиумов, каждый из которых по сути — «узкая» конференция. В научной программе конгресса нам удалось объединить достаточно широкую тематику пленарных лекционных выступлений лидеров мировой науки и специальные секционные заседания (их было около 40), провести отдельные симпозиумы. Одни из них были непродолжительными, однодневными, и ограничивались шестью—восемью докладами, другие — длились по три дня, и на них досконально разбиралось современное состояние конкретной области биологических знаний. Уникально то, что одновременно на площадке собирались выдающиеся ученые, принявшие на себя ответственность за развитие определенного научного направления.

**Конечно каждому ученому интересна в первую очередь область его занятий, но все же. Какие пленарные лекции и какие симпозиумы лично вам показались наиболее интересными?**



Вы правы, наука, при всей ее точности, дело довольно субъективное. Мне интересна тема врожденного иммунитета (хотя я этим и не занимаюсь) и очень понравилась лекция Ж.Хоффмана на эту тему. Надо сказать, что Хоффман (а мы с ним познакомились, повторю, задолго до того, как он получил Нобелевскую премию) — это пример научного подвижничества. В известной степени он продолжил работы нашего великого соотечественника И.И.Мечникова, которые, как часто бывает в науке, надолго были забыты. Лишь спустя век это направление вновь стало разви-

ваться. Хоффман, большую часть своей профессиональной жизни занимавшийся изучением биологии насекомых, заинтересовался тем, как эти существа борются с вредными факторами окружающей среды. В начале 90-х годов он вместе с Б.Лёметром занялся изучением механизмов врожденного иммунитета и пришел к открытию, отмеченному Нобелевской премией.

Не менее увлекательной была лекция другого нобелевского лауреата Д.У.Шостока (он награжден за открытие молекул, обеспечивающих контроль продолжительности жизни — теломеров и теломераз). Доклад был посвящен эволюции, при этом Шосток ссылаясь на своего предшественника и выдающегося нашего ученого А.И.Опарина. Огромный интерес вызвала лекция Р.Лернера (бывшего президента Института Скриппса в США) о том, как современные аспекты комбинаторной химии и биологии позволяют изучать разнообразие молекул и открывают новые пути создания препаратов «персонализированной медицины». Замечу, что на конгрессе велась видеозапись всех пленарных лекций, и те исследователи, студенты и аспиранты, которые не смогли принять участие в конгрессе, скоро смогут ознакомиться с ними на сайте конгресса FEBS—2013.

Было немало и ярких симпозиумов. К примеру, мы не побоялись поднять тему стволовых клеток. На этом симпозиуме, который провели член-корреспондент РАН А.Н.Томилин и британский профессор К.Блэкберн, обсуждались проблемы репрограммирования\* клеток и были начертаны пути новых клеточных технологий. Интересные темы по биофармацевтике, по канцерогенезу, по трансформации доброкачественных опухолей, по механизмам передачи сигнала G-белками\*\* и т.д.

На симпозиуме «Молекулярная организация генома», который организовали член-корреспондент РАН С.В.Разин и его британская коллега В.А.Бикмор, обрисована широкая палитра исследований; при этом большое внимание уделено проблемам эпигенетики и различным аспектам регуляции активности генов. И докладчики были

\* Репрограммирование клеток — технология, позволяющая возвращать взрослые клетки в эмбриональное состояние. В прошлом году за «открытие возможности репрограммирования дифференцированной клетки в плюрипотентную» Д.Б.Гёрдону и С.Яманаке присуждена Нобелевская премия. Подробнее см.: Киселев С.Л., Шутова М.В. Репрограммирование клеток: прыжок вверх по лестнице, ведущей вниз // Природа. 2010. №5. С.3—10; Шутова М.В. Нобелевская премия 2012 года по физиологии или медицине — Д.Б.Гёрдон и С.Яманакэ // Природа. 2013. №1. С.82—86. — *Примеч. ред.*

\*\* «За исследование рецепторов, сопряженных с G-белками», американские ученые Р.Лэфковиц и Б.Кобилка получили в прошлом году Нобелевскую премию по химии. Подробнее см.: Колесников С.С. Нобелевская премия 2012 года по химии — Р.Лэфковиц и Б.Кобилка // Природа. 2013. №1. С.78—82.

чрезвычайно сильными: П.Кук из Оксфордского университета рассказал о роли специализированных транскрипционных «фабрик» в работе генома, Т.Мистели из Национального института рака США — о связи организации генома и возникновения различных болезней и т.д.

«Мир РНК» собрал мировых лидеров в этой области, включая лауреата Нобелевской премии А.Э.Йонат (Израиль) и академика А.С.Спирина. Симпозиум был организован крупнейшим французским ученым Э.Вестхофом и членом-корреспондентом РАН О.А.Донцовой. Очевидно, что после выяснения трехмерной структуры рибосомы, осталось еще немало принципиальных вопросов, касающихся динамики работы участников рибосомного комплекса. Сейчас особенно заманчивы практические направления в данной области, а именно пути направленного синтеза новых антибиотиков, действующих на рибосомный комплекс. Можно с уверенностью сказать, что грядет эра создания так называемого направленного драг-дизайна — конструирования лекарственных препаратов с учетом особенностей индивидуальных рибосомных белков бактерий.

Наметился прорыв и в традиционной области биокатализа. (Организовать симпозиум на эту тему мне помог мой британский коллега М.Блэкберн.) Квантово-механические расчеты приблизили время, когда можно будет предсказывать «маршрут» биокаталитических реакций, а в будущем и константы скоростей их индивидуальных стадий. Безусловно, это позволит в перспективе *in silico* (с помощью компьютерного моделирования эксперимента. — *Ред.*) осуществлять расчеты метаболических путей, что безусловно найдет приложение в фармакологии, и в частности в фармакокинетических исследованиях.

Очень интересным был многодневный симпозиум «Биохимия для медицины», который организовали российские ученые член-корреспондент РАН С.Н.Кочетков и академик РАМН О.И.Киселев вместе с чешским профессором Т.Зима и академиком НАН Украины С.В.Комиссаренко. На симпозиуме прозвучали доклады о терапии рака и аутоиммунных заболеваний. Израильский исследователь М.Села — патриарх в этой области и создатель копаксона, известного препарата для лечения рассеянного склероза — рассказал об исследованиях этого тяжелого недуга. Очень интересными были сообщения в области направленной элиминации патологических В-клеток: созданы соединения нового класса, открывающие перспективы терапии таких аутоиммунных заболеваний, как системная красная волчанка, ревматоидный артрит и др.

Важным был и относительно короткий по времени, но увлекательный симпозиум в области опухолевой трансформации. Его организовали классики молекулярной биологии рака — академик РАН Г.П.Георгиев (Россия) и Дж.Шлессинд-



жер, глава департамента фармакологии Йельского университета. Лейтмотив этой сессии — направленные действие на рецепторы раковых клеток, обладающих протеинкиназной активностью. Очень интересны в этом ряду также сообщения о молекулах врожденного иммунитета, в частности об открытом в России белке Tag7 и создании на его основе различных противоопухолевых вакцин.

Академик В.Т.Иванов и член-корреспондент РАМН В.М.Говорун провели очень интересный симпозиум по биомедицинской протеомике и пептидомике. Эта быстро развивающаяся область не оставит скоро «белых пятен» в структуре белков человека и микроорганизмов. Необходимо сказать, что в этой области приоритет российских ученых вполне ощутим. Сосуществование высших и низших организмов крайне интересно как с точки зрения эволюционных воззрений, так и практики. Борьба «своей-чужой» важна для понимания проблем антимикробной терапии.

Интерес вызвали непродолжительные симпозиумы «Биохимия зрения», проведенный академиком РАН М.А.Островским, и «Биохимия нейродегенеративных заболеваний», которым руководил академик М.В.Угрюмов. В настоящее время пересматриваются общепринятые воззрения на пути борьбы с нейродегенерацией. Клонирование отдельных рецепторов, участвующих в передаче сигнала может быть крайне важным для разработки новых терапевтических средств.

Отечественная биоэнергетика имеет мировое признание во многом благодаря работам академика РАН В.П.Скулачева. Открытие новых путей регуляции «клеточных часов», изучение процессов, связанных с гибелью клетки, стало в центре внимания на симпозиуме по митохондриологии. Не забыты были и области биофизической химии и, связанные с ними аспекты биохимии. Вопросы динамики белков, проблемы сворачивания полипептидной цепи в белковую глобулу рассматривались на симпозиуме, организованном членом-корреспондентом РАН А.В.Финкельштейном в сотрудничестве с крупнейшим английским биофизиком К.Х.Чотией. Не были обойдены вниманием и «приборные аспекты» современной биохимии и молекулярной биологии. Вопросы ЯМР-спектроскопии обсуждались на заседании под руководством профессоров О.А.Федоровой и А.С.Арсеньева. На симпозиуме присутствовал нобелевский лауреат К.Вютрих, удостоенный премии за развитие этого метода в биологии.

Разумеется, я физически не мог посетить каждый симпозиум, однако по отзывам, ни один из них не был слабым.

**Скажите, а каково вообще лично вам было организовывать этот конгресс. Какие были трудности? Что удалось, а где, быть может, что-то не получилось?**

Я скажу так. Это трудно, очень трудно. Для меня вообще жизнь поделилась на «до» конгресса и «после». И сейчас я получаю удовольствие от того, что уже не надо заниматься оргвопросами конгресса.

Очень много было трудностей, в том числе и связанных исключительно с нашей страной. В первую очередь — это визовые трудности. Конечно у нас было постановление Правительства и был облегченный визовый режим, но в FEBS вообще требовался безвизовый режим. Нам удалось прийти к компромиссу, и все участники получали визы бесплатно и по телексу. Здесь нам помогли сотрудники Министерства образования и науки и Министерства иностранных дел. Я с удовольствием выражу благодарность Евгению Угриновичу, Александру Сумбатяну, Владимиру Арбузову, Альберту Гармашу и Александру Павлушко. Нам очень помогли вице-президент РАН Анатолий Иванович Григорьев, председатель Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга Андрей Максимов, исполнительный директор «Ленэкспо» и руководитель компании «Экспофорум» Сергей Воронков. Конгресс удалось провести благодаря работе компаний «Юридический форум» (Ольга Мотенко) и «Люмьер групп» (Екатерина Иванова).

Мы организовали очень хорошую культурную программу — и Эрмитаж, и ночная экскурсия по Питеру (конгресс же проходил в белые ночи)...

Вообще мне кажется, что FEBS нужно иметь при себе структуру по организации конгрессов, которая бы реплицировала ее по разным странам.

Хорошо, что нам удалось привлечь много молодежи, хотя получить из нашего Министерства какие-то деньги на стипендии молодежи для участия в конгрессе вышло не сразу. FEBS выделяет отдельные деньги на проезд 400 молодых ученых на конгресс, но страна-организатор не имеет права претендовать на эти стипендии. Часто это правильно — когда конгресс проходит в небольшой стране. Но у нас — совсем другое дело. И в итоге при помощи Константина Северинова проблему удалось решить.

**Конгресс закончился 11 июля. Вы вернулись в Москву. Продолжается ли какая-то деятельность, связанная с конгрессом?**

Да, разумеется. Примерно в течение года мы будем поддерживать сайт конгресса, сейчас будем выкладывать видеозаписи всех пленарных лекций. Материалы теперь не печатаются, они есть в электронном виде. Ну и дальше — продолжатся разнообразные постконгрессные научные, деловые контакты, и эффект от конгресса должен быть значительный. А через год — новый конгресс, в Париже. Потом в Берлине. Надеюсь, мы будем хорошо смотреться на фоне будущих конгрессов. Как говорят, мы задали весьма высокую планку. ■



## География

**И.Л.Кароль, А.А.Киселев.** ПАРАДОКСЫ КЛИМАТА. ЛЕДНИКОВЫЙ ПЕРИОД ИЛИ ОБЖИГАЮЩИЙ ЗНОЙ?  
М.: АСТ-Пресс Книга, 2013. 288 с.

Иллюстрированная научно-популярная книга рассказывает о современном климате Земли. Что такое климат и чем он отличается от погоды? Как взаимодействуют между собой отдельные части климатической системы? Что понимают специалисты под термином «глобальное потепление»? Как изменения климата отражаются на повседневной жизни людей? Что ждать от климата в ближайшие годы? Можно ли противостоять учатившимся катастрофическим проявлениям? На эти и многие другие вопросы даются ответы в книге. Отдельные ее разделы посвящены основным парниковым газам — углекислому газу, метану, озону, закиси азота, фреонам. Кратко рассказано о том, как происходило становление сети для измерения климатических характеристик. Большое место уделено модельным исследованиям — рассказывается о принципах, на которых создаются климатические модели, сильных и слабых сторонах, результатах, полученных с помощью математических моделей. Не обойдены вниманием альтернативные источники энергии.

Данное издание познакомит с современным состоянием климатической проблемы из первых рук, так как авторы — специалисты, долгие годы занимающиеся вопросами климатологии, физики и химии атмосферы.



## Океанология

**А.Б.Корольев.** ВОДОЛАЗКИ. ПЕРВЫЕ СРЕДИ РАВНЫХ. М.: printLETO (ООО «Лето Индастрис»), 2012. 96 с.



В книгу, состоящую из четырех глав («Профессионалы», «Они были первыми. Ученые под водой», «Профессиональные любители» и «Акванавты») вошли рассказы о 50 женщинах-подводниках, наших соотечественницах. Первыми были ученые: в конце 1920-х годов они начали работать на отечественном обитаемом подводном аппарате «Снаряд ЭПРОНА» и применять вентилируемое водолазное снаряжение. В конце 1930-х появились кислородные дыхательные аппараты и удобные гидрокостюмы. Перед Великой Отечественной войной водолазов-спасателей ОСВОДа вывели из-под действия водолазных правил, благодаря чему множество девушек воспользовались послаблениями и стали «легководолазами», а во время войны они заменили на водолазных работах мужчин, ушедших на фронт. После войны юридических оснований для обучения женщин тяжелой и опасной профессии водолаза не стало: ОСВОД ликвидировали, а спасателей причислили к водолазам. Но целеустремленные нашли лазейки — они числились инструкторами, начальниками спасательных станций, инженерами-гидротехниками, дрессировщиками морских животных. Ученые дамы в былые времена пользовались незнанием законов руководителями научных подразделений, а теперь, чтобы обойти запреты, называют себя «научными дайверами». Приятно отметить, что в ряду ученых-гидронавтов, о которых рассказывается в книге, есть и член редколлегии нашего журнала А.Ю.Лейн, и наш многолетний автор Э.А.Шушкина, которые работали на подводных аппаратах на глубинах свыше 3 тыс. м.

**Океанология. Биология**

**Н.Б.Келлер.** ГЛУБОКОВОДНЫЕ СКЛЕРАКТИНИЕВЫЕ КОРАЛЛЫ. М.: Красанд, 2012. 384 с.



Глубоководные склерактинии, лишённые симбиотических водорослей зооксантелл, хотя и обладают известковым скелетом, но не образуют коралловых рифов. Большинство из них — одиночные формы, обитающие в широком диапазоне глубин (от нескольких десятков метров до 6 км и более) и температур (от +20 до -1.1°C). Значительно меньшая часть глубоководных родов кораллов — колониальные организмы, создающие основу холодноводных коралловых банок на разных широтах и разных глубинах Мирового океана. На основании изучения уникальных коллекций, собранных в экспедициях научно-исследовательскими судами Института океанологии РАН в Мировом океане показаны особенности распространения этой небольшой группы животных и определяющие их экологические факторы. Изучение склерактиний проводилось по трем основным направлениям: сравнительно-морфологическому (морфофункциональный анализ скелета), экологическому (выявление зависимости морфологии скелета от условий окружающей воды) и естественноисторическому (пути формирования и особенности распространения в океане батиальной фауны склерактиний, происхождение их абиссальной фауны и собственно отряда *Scleractinia*). На примере глубоководных склерактиний автору удалось подойти к решению ряда проблем: общие закономерности расселения донных беспозвоночных в Мировом океане, характер и направленность морфологических изменений в ходе завоевания ими больших океанических глубин, предложить новое решение вопроса об истории формирования глубоководной фауны.

**Зоология. Энтомология**

**М.Г.Кривошеина.** ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ СЕМЕЙСТВ И РОДОВ ПАЛЕАРКТИЧЕСКИХ ДВУКРЫЛЫХ НАСЕКОМЫХ ПОДОТЯДА NEMATOCERA ПО ЛИЧИНКАМ. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 244 с.

Подотряд длинноусых двукрылых насекомых насчитывает более 45 семейств. К нему относятся такие хорошо известные и важные группы, как кровососущие комары, мошки, мокрецы, грибные комарики и др. Личинки длинноусых двукрылых освоили практически все известные типы субстратов — наземные (почва, подстилка, древесина, плодовые тела грибов, скопление древесного сока на стволах), полуводные и водные. До сих пор общего определителя этих насекомых по преимагинальным стадиям не было.

Издание представляет результаты ревизии обширной, собранной на территории России и сопредельных стран коллекции личинок более чем 170 родов из 35 семейств данного подотряда. В первых главах книги приведены морфологическая характеристика личинок, система подотряда, охарактеризована связь личинок с водной средой и представлена классификация мест их обитания. Таблицы для определения семейств даны раздельно для водных и наземных личинок, что позволило значительно сократить определительские ключи и сделать их более удобными в применении. В таблицы родового уровня включены 32 семейства. В издании имеются приложения — альбом черно-белых рисунков личинок и отдельных их структур и таблицы с цветными фотографиями.



## Геофизика

**В.Н.Жарков.** ФИЗИКА ЗЕМНЫХ НЕДР. М.: Наука и образование, 2012. 384 с.

В 1983 г вышла книга В.Н.Жаркова «Внутреннее строение Земли и планет», в 1986 г. она в несколько расширенном варианте была опубликована на английском, испанском и итальянском языках и до сих пор используется как введение в предмет теми, кто интересуется строением Земли, планет и спутников. С тех пор геофизика бурно развивалась, и наука о внутреннем строении Земли стала более обширной и междисциплинарной. Поэтому у автора возникла мысль дополнить книгу современным материалом. За прошедшие 30 лет региональность Земли, можно сказать, проникла до самого ее твердого, внутреннего ядра, и модель внутреннего строения планеты из одномерной, радиально симметричной, превратилась в сложный трехмерный объект изучения. Сама геофизика стала более детальной и соответственно более сложной. Новое издание может рассматриваться как продолжение упомянутой книги. Это не учебник, поэтому она не может служить для первого чтения о физике Земли, а рассчитана на подготовленного читателя.

В монографии сформулированы и проанализированы основные проблемы физики земных недр. Рассмотрены новая одномерная референсная модель Земли с трансверсальной симметрией STW105 (современный вариант модели PREM), а также трехмерные томографические модели мантии и региональные сейсмические модели верхней мантии. Большое внимание уделено затуханию собственных колебаний Земли и сейсмических волн, а также дисперсии сейсмических скоростей и твердотельным физическим механизмам затухания. Приведены данные о глобальной трехмерной модели затухания верхней мантии QRFSI12, рассмотрен вопрос об оценке свойств океанической верхней мантии, обсуждается состав и пиролитовая модель мантии. Приводятся основные понятия мантийной конвекции, и обсуждается проблема, как субдуцирующие блоки океанической литосферы проходят сейсмическую границу на глубине 660 км. Большое внимание уделено оценке содержания и анализу свойств воды в мантии, а также таким вопросам, как ее окислительно-восстановительное состояние и концентрация  $Fe^{3+}$  в мантийных минералах. Приведены сейсмические данные, свидетельствующие о незначительном переносе воды субдуцирующими блоками из верхней мантии в переходную зону. Подробно рассматриваются способы определения электропроводности вещества в недрах Земли — как по геофизическим данным, так и по результатам лабораторных измерений электропроводности основных мантийных минералов. Специальные параграфы книги посвящены минералогии нижней мантии, адиабатическим температурам и температуре плавления мантии, ее вязкости и анизотропии, коэффициенту теплопроводности земных недр. В заключительном параграфе приведена геодинамическая интерпретация последних данных о свойствах внешнего жидкого и внутреннего твердого ядра Земли.





# Камнерезное искусство в Китае

Г.Ф.Уфимцев

доктор геолого-минералогических наук  
Институт земной коры СО РАН  
Иркутск

**П**риродный камень, горные породы всегда были среди первых предметов в материальной культуре людей. И сейчас мы нередко находим в земле мельчайшие каменные осколки, умело обработанные человеком: наконечники стрел из полупрозрачного и молочно-белого халцедона или столь же прекрасные топоры из кварца и нефрита. Их можно было укрепить на топорнице из упругой ивы или тальниковых прутьев.

Всю историю рода человеческого сопровождает искусно обработанный (оббитый и сглаженный) каменный материал. В Китае это длится уже несколько тысячелетий, и любой турист на улицах городов здесь постоянно встречается с торговлей каменными изделиями. Мне повезло посетить эту страну пять раз, и все время возвращение домой сопровождалось упаковкой разнообразных поделок из природного камня, купленных на улицах и в небольших магазинчиках.

Китайские мастера обычно используют пластинчатые блоки для пейзажных картин и более крупные куски для вырезания фигурок людей и животных и различных предметов интерьера.

Однажды, прогуливаясь вечером по припортовой части г.Дайрена на Квантунском п-ове, я увидел выставку-продажу пейзажных камней. Некоторые изделия по высоте доходили мне до пояса.



Пластины пейзажного камня.

Здесь и далее фото автора

В памяти запечатлелись две работы. На первой, на чуть волнистой поверхности росли одинокие лиственницы (выделения черного гидроксида марганца — вернадита) и мелкие кусты березового стланика. Над ними простиралось темно-серое хму-

рое небо. Сколько раз поздней осенью в заснеженной лесотундре я наблюдал такую картину, выходя утром из палатки перед маршрутом!

На другой, представляющей собой пластинчатую карбонатную породу, были изображены



Фигурка черепахи и целестиновая астра.



Вазы с вырезанными на поверхности драконами.



Фигурки драконов.



Пестики для растирания туши.



Мифическое китайское животное — чинлин.



шарообразные горы с редкими деревьями. Они напомнили мне карстовые горы Гуйлинь, небольшую экскурсию по которым мы предприняли в одну из поездок по Китаю.

Еще один способ обработки камня — выработка кристаллов и установка их на небольших подставках, при этом минералы сохраняют все свои природные особенности. Как хороши были

белые астры, выполненные солнцеобразными лучистыми стяжениями целестина ( $\text{SrSO}_4$ ). Радиально-лучистая структура камня используется и при изготовлении удивительных ваз,





Традиционный китайский лев, небольшая маска и фигурка монаха.



Фигурки доисторических животных.

на поверхности которых часто вырезаются фигуры драконов. По китайской традиции фигурки обычно продаются парами. Нередко применяется зеленый камень, очень похожий на нефрит. Однако твердость его невелика, и скорее всего это какая-то карбонатная порода.

Из этого же материала изготавливаются фигурки мифических животных. Чаще всего это драконы и так называемые чинлины — существа, в облике которых видны черты различных

животных: голова дракона, копыта буйвола, хвост лошади, чешуйчатое тело и др. А традиционные львы обычно венчают небольшие пестики для растирания туши. Еще одна популярная группа фигур — скульптурки монахов (даосов).

В последнее время в уличной продаже появились стилизованные изображения доисторических животных. Не так давно в Китае были обнаружены многочисленные местонахождения ископаемых динозавров, и кам-

нерезное дело живо отреагировало на возникший интерес.

В музеях и дорогих магазинах встречаются изделия из красного коралла, которые всегда недешевы.

Ныне при обработке природного камня используются современные технологии, включающие и компьютерную обработку. Все это способствует развитию камнерезного искусства и позволяет китайским изделиям завоевывать рынки сбыта во всем мире. ■



# Правила для авторов

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

ся и проходят редакционную подготовку.

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

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

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

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

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

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

Над номером работали

Ответственный секретарь

**Е.А.КУДРЯШОВА**

Научные редакторы

**О.О.АСТАХОВА**

**М.Б.БУРЗИН**

**Т.С.КЛЮВИТКИНА**

**К.Л.СОРОКИНА**

**Н.В.УЛЬЯНОВА**

**О.И.ШУТОВА**

Выпускающий редактор

**Л.П.БЕЛЯНОВА**

Литературный редактор

**Е.Е.ЖУКОВА**

Художественный редактор

**Т.К.ТАКТАШОВА**

Заведующая редакцией

**И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА**

Перевод:

**С.В.ЧУДОВ**

Корректоры:

**М.В.КУТКИНА**

**Л.М.ФЕДОРОВА**

Графика, верстка:

**А.В.АЛЕКСАНДРОВА**

Свидетельство о регистрации  
№1202 от 13.12.90

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

Адрес редакции: 119049,  
Москва, Мароновский пер., 26  
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77  
Факс: (499) 238-24-56

E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 22.08.2013  
Формат 60×88 1/8  
Офсетная печать  
Заказ 1607  
Набрано и сверстано в редакции

Отпечатано в ППП типографии «Наука»  
Академиздатцентра «Наука» РАН,  
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.