

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

2 17



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

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

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

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Озеро Онон. Здесь обнаружено всего два вида рыб — голян и байкало-ленский хариус, которых нет в других горных озерах бассейна Амура.

См. в номере: **Антонов А.Л.** *Рыбы в горных озерах бассейна Амура.*

Фото автора

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Молодые деревья (подрост) березы Эрмана и густотой древостоя, и формой кроны, и стройностью стволов, и белизной коры достойно соперничают с подмосковными березками.

См. в номере: **Быкасов В.Е.** *Каменная береза Камчатки.*

Фото В.Е.Быкасова



«Наука»

© Российская академия наук, журнал «Природа», 2017
ФГУП «Издательство «Наука», 2017
© Составление. Редколлегия журнала «Природа», 2017

В НОМЕРЕ:

3 **Б.П.Кондратьев** **Уникальное трио: карликовая планета Хаумеа и ее спутники**

Один из самых интересных объектов пояса Койпера, Хаумеа, при более чем солидных размерах вращается вокруг своей оси очень быстро. Почему это так и как образовалась пара спутников планеты, помогает понять динамическая модель ее структуры.

11 **А.Л.Волынский** **Можно ли размягчить жесткий полимер?**

Нас повсюду окружают полимерные изделия, созданные на основе как стеклообразных/кристаллических, так и каучукоподобных материалов. Можно ли реализовать достоинства обоих этих состояний полимеров одновременно?

18 **А.Н.Иванов** **Остров Матуа: активный вулкан и военная база**

Матуа — один из островов Курильской гряды. Здесь расположен активный современный вулкан Пик Сарычева, а берега сплошь покрыты остатками наземных и подземных военных объектов, построенных японцами в годы Второй мировой войны. Все вместе это создает уникальный ландшафт, аналогов которому нет в России.

27 **Е.О.Пучков** **Биогенное управление образованием льда**

При температурах, когда вода превращается в лед, выживание некоторых холонокровных животных, растений и микроорганизмов обеспечивается тремя уникальными биогенными молекулярными «инструментами»: коллигативными антифризами, антифризными белками и льдонуклеирующими агентами.

38 **А.А.Никонов** **Аргонавты: испытание на пути в Понт**

В истории Древней Греции немало сведений о реальных сильных землетрясениях и цунами. Часть их внесена в современные каталоги: сейсмический и цунами. Несомненно, подобные события возникали и в архаичные времена. Но отражались они исключительно в мифах и эпосе.

Научные сообщения

46 **Е.Д.Суровяткина** **Долгосрочный прогноз летнего муссона в Индии (46)**

Г.Н.Ганин

**Почему на Сахалине и Кунашире
отсутствуют тропические земляные
черви *Drawida*? (49)**

А.Л.Антонов

**Рыбы в горных озерах
бассейна Амура (54)**

**В.Н.Комаров, Г.В.Агафонова,
Е.В.Ковальчук**

**Как каменная монетка
стала «золотой» (61)**

В.В.Глушков

**Иодо — скала раздора
в Восточно-Китайском море (66)**

Времена и люди

72 **Р.Н.Щербаков** **Жизнь под знаком исследования времени** К 100-летию со дня рождения И.Р.Пригожина

81 **Новости науки**

Экологичный способ получения кремниевых нанонитей (81). Микрофокусный рентгеновский источник с визуализацией излучения. **А.Г.Турьянский** (81). Титано-завры: новые данные о возрастной и индивидуальной изменчивости зубов. **А.О.Аверьянов** (83). Умревинский монетный клад: новые открытия. **А.П.Бородовский** (85).

87 **Новые книги**

В конце номера

89 **В.Е.Быкасов** **Каменная береза Камчатки**

CONTENTS:

- 3 B.P.Kondratyev**
Unique Trio: Dwarf Planet Haumea and Its Satellites
One of the most interesting Kuiper belt objects, Haumea, is rather massive but rotates around its axis very quickly. Why is it so and how did a pair of planet's satellites form? The dynamic model of Haumea structure helps to find the answers to these questions.

- 11 A.L.Volynskii**
Can a Rigid Polymer Be Softened?
In our daily life, we are surrounded by diverse products based on glassy/crystalline and rubbery polymers. The question is whether the advantages of both states can be realized simultaneously?

- 18 A.N.Ivanov**
Matua Island: Active Volcano and Military Base
Matua is one of the islands of the Kuril Ridge. Active volcano — Sarychev Peak — is located here, and all over the coast there are remnants of above ground and underground military facilities built by the Japanese during World War II. All together it creates a unique landscape with no equals anywhere in Russia.

- 27 E.O.Puchkov**
Biogenic Control of Ice Formation
At temperatures when water freezes into ice, the survival of some cold-blooded animals, plants and microorganisms is provided by three unique biogenic molecular «tools» — colligative antifreezes, antifreeze proteins and ice-nucleating agents.

- 38 A.A.Nikonov**
Argonauts: the Test on the Road to Pontus
In the history of Ancient Greece there are a lot of data about real tsunamis and powerful earthquakes. Part of them is listed in modern catalogues — in seismic and in tsunami ones. Undoubtedly, such events had also happened in archaic times. But they were reflected in myths and epos only.

Scientific Communications

- 46 E.D.Surovyatkina**
Long-term Forecast of Indian Summer Monsoon (46)
G.N.Ganin
Why are Tropical Earthworms Drawida Absent on Sakhalin and Kunashir? (49)
A.L.Antonov
Fish in the Mountain Lakes of Amur Basin (54)
V.N.Komarov, G.V.Agafonova, E.V.Kovalchuk
How the Stone Coin Became «Golden» (61)
V.V.Glushkov
Iodo — a Rock of Discord in the East China Sea (66)

Times and People

- 72 R.N.Shcherbakov**
Life under the Sign of Time Research To the 100th Birthday Anniversary of Ilya Prigogine

- 81 Science News**
 Eco-friendly Technique for Producing Silicon Nanowires (81). Microfocus X-ray Source with Visualization of Radiation. **A.G.Turyansky** (81). Titanosaurs: New Data on the Age and Individual Variation of Teeth. **A.O.Averianov** (83). Umrensky Coin Treasure: New Findings. **A.P.Borodovskiy** (85).

- 87 New books**

- 89 End of the Issue**
V.E.Bykasov
Stone Birch of Kamchatka

Уникальное трио: карликовая планета Хаумеа и ее спутники

Б.П.Кондратьев

Стремясь постичь гармонию мира, о которой мечтали классики науки, ученые все глубже проникают в сложную картину Вселенной, расширяя наши представления не только о межгалактических просторах, но и о ближайшем к нам пространстве — о Солнечной системе. Поговорим в этой статье о телах, населяющих пояс Койпера — область, лежащую в пределах от 30 до 55 а.е. от нашего светила.



Борис Петрович Кондратьев, профессор, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова и ведущий научный сотрудник Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (Санкт-Петербург). Область научных интересов — небесная механика, астрофизика.

Неизведанные дали

До недавнего времени лишь звезды и кометы будили воображение и напоминали о существовании неизведанного мира. Еще лет двадцать назад мы почти ничего не знали о космических телах за орбитой Нептуна, т.е. на расстояниях от Земли, превышающих 4,5 млрд км. Только Плутон, сыгравший роль первой ласточки из пояса Койпера (разжалованный недавно из обычных планет в карликовые), долгое время был единственным исключением. Но одна ласточка еще не делает весны. С совершенствованием средств наблюдения положение начало быстро меняться, и сейчас нам известно, что там, в бездонных глубинах Космоса, откуда Солнце видится лишь яркой звездоч-

Ключевые слова: небесная механика, Солнечная система, пояс Койпера, малые планеты, фигуры равновесия, спутники.

Key words: celestial mechanics, Solar system, Kuiper Belt, minor planets, equilibrium figures, satellites.

кой, степенно и неспешно движутся огромные каменно-ледяные астероиды и планетоиды. Их скорости на орбитах вокруг Солнца малы, а периоды обращения вокруг центрального светила столь велики, что история нашей цивилизации от древнегреческого марафона до вожделенного iPhone не покрывает и малой части периода обращения в 12 тыс. лет у недавно открытой карликовой планеты Седны. Той самой Седны, которая может уходить за пояс Койпера настолько далеко, что оттуда рукой подать до подлинной *terra incognita* — до облака Оорта. По последним данным в поясе Койпера (само это название появилось на небесной карте в 1992 г.) нам известно более 2,5 тыс. тел, размеры которых варьируют от 150 до 2300 км.

Следует отдать должное труду астрономов, наблюдателей и вычислителей, ведь изучать далекие небесные тела очень трудно. Даже самые лучшие телескопы дают о телах в поясе Койпера весьма скудные сведения. Почти вся информация исходит лишь от нескольких активных групп ученых, имеющих доступ к лучшим наблюдательным средствам и владеющих методикой открытия новых объектов. Но эта информация бесценна, так как затрагивает важные вопросы происхождения Солнечной системы и жизни на Земле.

© Кондратьев Б.П., 2017

Планета Хаумеа — первое знакомство

В числе самых интересных объектов за Нептуном — карликовая планета Хаумеа (рис.1, 2), открытая в поясе Койпера в 2005 г. [7, 10]. Свое имя она получила в честь гавайской богини плодородия. Это один из самых крупных занептуновых объектов, достигающий в поперечнике 2 тыс. км (по размерам лишь немного уступает Плутону). Хаумеа вращается вокруг Солнца с периодом 281.83 года и находится в орбитальном резонансе 12:7 с Нептуном*.

Чем же она так привлекательна для астрономов? Сюрпризом стало уже то, что при столь солидных размерах Хаумеа очень быстро (со скоростью, в шесть раз большей, чем у Земли!) вращается вокруг своей оси. Период вращения этой мини-планеты T оказался меньше четырех часов: если точнее, $T \approx 3.915$ ч. Среди известных объектов Солнечной системы, поперечник которых больше

* Это означает, что за 12 периодов обращения гиганта Нептуна вокруг Солнца карликовая планета Хаумеа делает семь оборотов.



Рис.1. Карликовая планета Хаумеа рядом с самыми крупными транснептуновыми объектами.

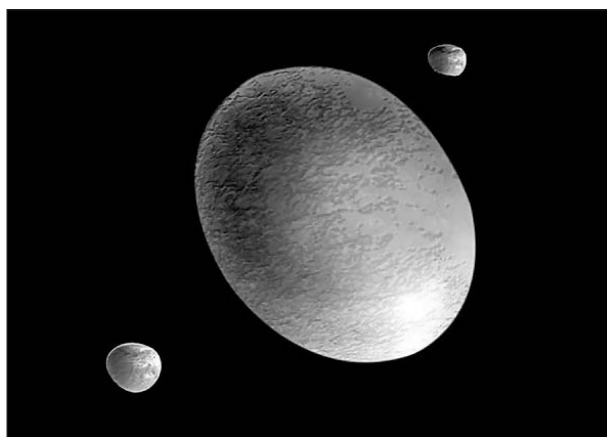


Рис.2. Карликовая планета Хаумеа и два ее спутника Хианка и Намака в представлении художника.

100 км, Хаумеа крутится быстрее всех. Столь стремительное вращение ставит на первое место *вопрос о ее фигуре равновесия*. Для объяснения этого важного понятия сделаем...

...экскурс в теорию фигур равновесия

Под фигурами равновесия в механике и астрономии понимают конфигурации, которые может принимать вращающаяся гравитирующая масса жидкости. Теория фигур равновесия [1, 2] возникла из попыток узнать и объяснить форму Земли. Ньютон первым понял, что с помощью закона всемирного тяготения можно исследовать не только движение небесных тел, но и их форму. Блестящая мысль! Со временем теория окрепла и достигла подлинной математической виртуозности. Нахождение фигур равновесия и изучение их устойчивости стало важной задачей. Над этими проблемами трудились многие великие ученые. Проникнув под вуаль математики, они обнаружили там объекты поразительной гармонии и красоты, достойные удивления древних греков.

Невращающаяся звезда, или гравитирующая жидкая масса, имеет форму шара. Та же однородная масса, но с вращением, непременно примет форму сжатого сфероида. Последовательность таких фигур называется сфероидами Маклорена. Лагранж во втором томе знаменитой «Аналитической механики» пришел к выводу, что, кроме сфероидов, других фигур равновесия нет. Но в действительности все оказалось сложнее и интереснее! В благородном семействе назрел конфликт, ведь дело касалось самого главного: обязаны ли фигуры равновесия иметь осевую симметрию? Поразительно, но задолго до Лагранжа ясный намек на правильный ответ дал Клеро. Сильный толчок к развитию теории дал в 1834 г. Якоби, указавший (в духе вызова Лагранжу!) на возможность существования вращающихся фигур с формой трехосного эллипсоида. Замечательно, что последовательность эллипсоидов Якоби отвечается (здесь, кстати, и появилось важное понятие фигуры или точки бифуркации!) от критического сфероида Маклорена.

Сфероиды Маклорена и эллипсоиды Якоби — это фигуры относительного равновесия, не имеющие во вращающейся системе отсчета, которая связана с главными осями инерции, внутренних течений жидкости. Кроме упомянутых существует также обширный класс эллипсоидов с внутренними течениями. Эту важную проблему поднял Дирихле, а в ее разработку большой вклад внесли Риман и Чандрасекар. Это был новый виток в познании фигур равновесия.

Читателю полезно знать, что теория фигур равновесия и ныне актуальна и служит тем фундаментом, на котором построены геофизика, теория строения планет, звезд и галактик, некоторые разделы астрофизики.

Ключевым в теории фигур равновесия оказывается *положение об уровненных поверхностях*. Уровненной называют такую поверхность, в каждой точке которой полный (гравитационный плюс центробежный) потенциал имеет одинаковое значение. Полная сила всегда нормальна к уровненной поверхности (в частности, граница фигуры всегда будет поверхностью уровня). Отметим еще, что *внутри неоднородной фигуры равновесия уровненные поверхности должны совпадать с поверхностями равной плотности вещества и поверхностями равного давления*.

Хаумеа в свете теории фигур равновесия

Но вернемся к главной теме. Так как Хаумеа состоит из каменного ядра и ледяной оболочки, читатель вправе спросить, на каком таком основании теорию жидких фигур равновесия можно применять к твердым космическим объектам. Это интересный и важный вопрос, обстоятельный ответ на него заслуживает отдельной монографии. Кратко говоря, дело вот в чем: на больших временах (порядка десятков и сотен миллионов лет) любой твердый материал проявляет свои пластические свойства и течет при весьма малых напряжениях. *Все зависит от размеров тела*. Ученые подсчитали, что для образования фигуры равновесия сил самогравитации хватит, если поперечник твердого тела составит около сотни километров. Размер же Хаумеа в поперечнике 2 тыс. км! Такая планета заведомо будет стремиться к одной из возможных для нее форм равновесия.

Выяснив это, заметим: по данным статьи [7], кривая блеска Хаумеа, т.е. изменение во времени потока отраженного солнечного света, имеет два неравных друг другу максимума, что говорит именно о трехосной (эллипсоидальной) фигуре тела планеты.

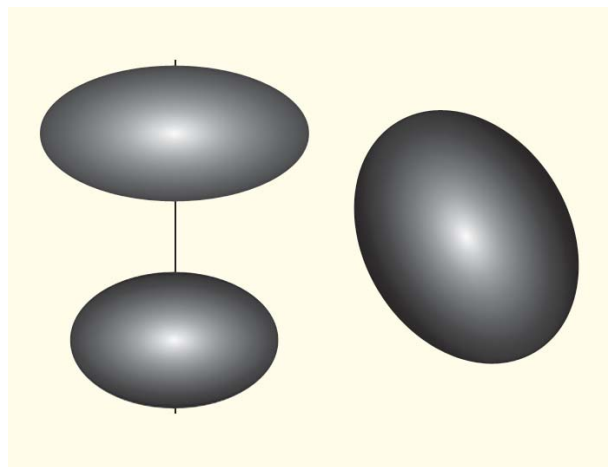


Рис.3. Две экваториальные (слева) и полярная (справа) проекции трехосного тела Хаумеа.

Чтобы правильно оценить размеры и среднюю плотность планеты, надо знать ориентацию ее оси вращения. Пока прямых данных об этом нет, и принято считать, что ось вращения планеты Хаумеа перпендикулярна лучу зрения наблюдателя.

Итак, в первом приближении Хаумеа можно считать классической трехосной фигурой относительного равновесия (эллипсоидом Якоби) с полуосями $a_1 > a_2 > a_3$ (рис.3).

Внутренний потенциал эллипсоида хорошо известен [1, 6]:

$$\Phi = \pi G \rho (I - A_1 x_1^2 - A_2 x_2^2 - A_3 x_3^2), \quad (1)$$

(здесь G — гравитационная постоянная, ρ — плотность, I — значение приведенного потенциала в центре), а A_i — коэффициенты, зависящие только от сжатия главных сечений эллипсоида. Вращение (с угловой скоростью Ω) и форма эллипсоида Якоби описывается формулами [2, 4, 6]

$$\frac{\Omega^2}{2\pi G \rho} = \frac{A_1 a_1^2 - A_2 a_2^2}{a_1^2 - a_2^2}; \quad (2)$$

$$a_1^2 a_2^2 \frac{A_2 - A_1}{a_1^2 - a_2^2} = A_3 a_3^2,$$

по которым можно уточнить размеры планеты Хаумеа и получить значения ее полуосей ($a_1 = 978$ км, $a_2 = 737.61$ км, $a_3 = 496$ км), а также средний радиус ($R = 716.29$ км). Поскольку планета имеет два небольших спутника [11] (о них чуть позже), то, зная период их обращения, по законам небесной механики нашли массу Хаумеа: $M_x = 4.006 \cdot 10^{24}$ г. Следовательно, средняя плотность ρ планеты равна 2.6023 г/см³. Эти величины и будут приняты нами в качестве исходных параметров для построения более точной модели Хаумеа.

Изучение спектра отражения Хаумеа показало, что ее поверхность покрыта почти чистым водяным кристаллическим льдом с незначительным содержанием примесей более сложных соединений. Аналогичные спектры имеют и ее спутники — такое сходство наводит на мысль, что последние образовались из вещества верхнего слоя самой планеты. Запомним этот полезный вывод.

О спутниках Хаумеа (к ним особое внимание, ведь это дети гавайской богини плодородия!) известно также следующее [11]. Более крупный и яркий из них, Хииака, — внешний спутник. Он имеет массу $0.00451 M_x$ и диаметр около 310 км. Орбита Хииаки почти круговая с большой полуосью 49 880 км и периодом обращения $T_1 = 49.462$ сут. Второй спутник (Намака) обращается вокруг Хаумеа за $T_2 = 18.2783$ сут по сильно эллиптической орбите с эксцентриситетом 0.249 и малой полуосью 25 657 км, его масса на порядок меньше, а диаметр равен приблизительно 170 км. Заметим, что размеры и массы спутников были рассчитаны из того предположения, что альбедо у них такое же, как и у Хаумеа. Плоскости орбит спутников наклонены друг к другу под углом 13.2° .

Как образовались спутники?

Почти сразу с открытием Хаумеа и ее спутников некоторые исследователи высказали гипотезу [7, 10], что эти спутники появились в результате столкновения (импакта) планеты с другим астероидом. Столкновение произошло очень давно, в раннюю эпоху эволюции Солнечной системы. Предполагалось, что удар привел к быстрому вращению планеты и к отрыву от ее поверхности больших кусков льда (11% от массы оболочки), из которых и образовались спутники планеты. Затем, по приливному сценарию, за миллиарды лет орбита Хииаки постепенно округлилась. Орбита же спутника Намака из-за сильного возмущения орбитальным резонансом 8:3 с более массивной Хииакой оказалась эллиптической. Сейчас оба спутника постепенно удаляются на своих орбитах от Хаумеа из-за приливного ускорения.

Однако сценарий описанного импакта остается по преимуществу умозрительным и не опирается на точные расчеты. Не учитываются многие обстоятельства. Прежде всего, сомнительно, что сильнейший удар, закрутивший Хаумеа с такой большой скоростью, содрал с ее поверхности не весь лед, а лишь 11% ее хрупкого ледяного покрова (на самом деле, как мы покажем, эта цифра еще ниже). Кроме того, удар со случайного направления с большой долей вероятности привел бы к образованию спутников, двигающихся в совершенно произвольных плоскостях по отношению к фигуре планеты. Однако из наблюдений достоверно известно, что орбита Намаки расположена почти в экваториальной плоскости планеты, а плоскость орбиты массивной Хииаки отклоняется от нее лишь на 13° .

Стоит поэтому поискать, нет ли для Хаумеа другого физического механизма образования спутников. Этот сложный вопрос требует детального изучения условий равновесия на планете, чем мы сейчас и займемся.

Анонс

Ранее мы уже говорили о важной роли уровня поверхности, а теперь обратим внимание на некоторые следствия. Предваряя математические расчеты, заметим, что в рассматриваемой модели «мантия—ядро» поверхность раздела льда и камня не может быть уровня (равновесной) одновременно с внешней поверхностью планеты. Действительно, *теория фигур равновесия гласит, что в данной неоднородной модели с заданным твердотельным вращением эквипотенциальной может быть только одна из двух указанных поверхностей*. Появляющееся малое рассогласование условий равновесия играет важную роль в эволюции планеты, так как запускает особый механизм релаксации ее недр к равновесному со-

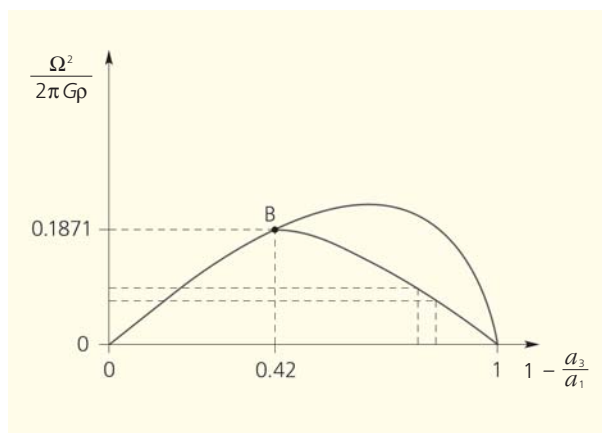


Рис.4. Квадрат угловой скорости классических фигур относительного равновесия вращающейся гравитирующей жидкости в зависимости от сжатия [2, 6]. Кривая сверху — сфероиды Маклорена; от них в точке бифуркации В отщепляется последовательность эллипсоидов Якоби. Для конкретного углового момента трехосного эллипсоида меньшей скорости вращения соответствует более вытянутая в экваториальной плоскости фигура равновесия.

стоянию. Здесь необходимо учитывать еще одно важное следствие из теории фигур равновесия: при фиксированном угловом моменте трехосного эллипсоида чем медленнее этот эллипсоид вращается, тем больше он вытягивается в экваториальной плоскости (рис.4). Другими словами, при замедлении вращения эллипсоида Якоби сжатие его экваториального сечения, вопреки интуитивному ожиданию, будет не уменьшаться, а возрастать! Именно это свойство динамики каменного ядра и приводит к накоплению во внешнем слое льда касательных (растягивающих) напряжений. По мере накопления этих напряжений упругая деформация льда сменяется деформацией пластической, после чего лед растрескивается и сползает к острым краям эллипсоида. В итоге с концов быстро вращающейся планеты Хаумеа отделяются значительные массы льда — из них впоследствии и образовались спутники.

Постановка задачи

Переходим к главному и рассмотрим второе (вслед за простым первым — однородным) приближение для нашей модели, учитывая неоднородность реальной планеты. Напомним, что модель представляет собой совокупность двух подсистем: на однородное эллипсоидальное каменное ядро с плотностью ρ' и поверхностью S'

$$\frac{x_1^2}{a_1'^2} + \frac{x_2^2}{a_2'^2} + \frac{x_3^2}{a_3'^2} = 1, \quad a_1' > a_2' > a_3' \quad (3)$$

накладывается тоже однородная, тоже эллипсоидальная, но ледяная, т.е. с другой плотностью (ρ),

толстая оболочка, ограниченная внешней поверхностью S , полуоси которой в таком же уравнении будем обозначать по-прежнему без штриха ($a_1 > a_2 > a_3$). Так как $\rho' > \rho$, условие глобальной устойчивости в модели выполняется.

Равновесие жидкой (напомним, что на больших временах твердое тело таких солидных размеров ведет себя как жидкость) массы, вращающейся вокруг оси Ox_3 с угловой скоростью Ω , описывается уравнением [2, 6]

$$\text{grad} p = \rho \text{grad} \Phi. \quad (4)$$

Здесь $p(x)$ — давление в жидкости, а $\Phi(x)$ — полный потенциал, равный сумме гравитационного $\phi(x)$ и центробежного потенциалов $1/2\Omega^2(x_1^2 + x_2^2)$. Из (4) следует, что если достигнуто равновесие, поверхности равного давления $p(x) = \text{const}$ и плотности $\rho(x) = \text{const}$ должны совпадать с уровнями (эквипотенциальными) поверхностями полного потенциала $\Phi(x) = \text{const}$.

Последнее означает, что гравитационный потенциал на поверхностях S и S' модели должен быть квадратичной функцией от координат пробной точки x . Но это возможно только при одном дополнительном условии: внешняя эллипсоидальная оболочка должна быть софокусной эллипсоидальной поверхности ядра. Другими словами, внешний слой льда в модели следует взять в виде однородного фокалоида*. Подчеркнем, что выбор оболочки такой формы не произволен, а связан с замечательными гравитационными свойствами фокалоидов, частично изученных в трудах классиков (Маклорена и Лапласа, см. [4, 5], а более полно — в работах [2, 3]).

Некоторые математические трудности связаны с тем, что внешний потенциал от эллипсоидального каменного ядра в точках ледяного слоя в общем случае не обязан быть квадратичной функцией от координат. Не приводя соответствующей интегральной формулы, суммирующей вклад от всех элементов ядра, заметим лишь, что все упирается в нижний предел интеграла. Его роль играет эллипсоидальная координата $\lambda(x)$, которая есть положительный корень кубического уравнения

$$\frac{x_1^2}{a_1^2 + \lambda} + \frac{x_2^2}{a_2^2 + \lambda} + \frac{x_3^2}{a_3^2 + \lambda} = 1, \quad (5)$$

Здесь есть та тонкость, что для фокалоида должно выполняться условие совпадения фокусов у всех трех главных эллипсов поверхностей S' и S : $a_1'^2 = a_1^2 - \lambda$, $a_2'^2 = a_2^2 - \lambda$, $a_3'^2 = a_3^2 - \lambda$.

Найдем теперь гравитационные потенциалы модели «эллипсоидальное ядро + софокусный слой». Гравитационный потенциал на внешней по-

верхности тела S складывается из двух компонент — вкладов от самой оболочки и от ядра. Не излагая в деталях всю методику расчета (см. [4, 9]), сформулируем результат: исследования показали, что полный потенциал на поверхности тела будет квадратичным относительно координат:

$$\Phi = \pi G \rho_{\text{cp}} (I - A_i x_i^2), \quad (6)$$

если (и только если) входящая в формулу (6) средняя плотность ρ_{cp} в модели будет равна

$$\rho_{\text{cp}} = \rho + (\rho' - \rho) \frac{a_1' a_2' a_3'}{a_1 a_2 a_3}. \quad (7)$$

Соответствующим подбором новых коэффициентов \tilde{A}_i (они будут выражаться через определенные интегралы, включающие геометрические параметры модели) можно добиться, чтобы квадратичным оказался и потенциал в точках поверхности S' между ядром и оболочкой — тот описывается немного более сложным выражением, чем формула (6).

Таким образом, вводя комбинированную плотность (7), потенциал на внешней поверхности модели и на поверхности раздела ядра и оболочки действительно можно представить квадратичной функцией от координат. Однако это необходимое, но еще не достаточное условие для равновесия в нашей модели.

Эквипотенциальные поверхности

Теперь надо выяснить, при каких условиях модель будет удовлетворять достаточному условию относительного равновесия: совпадению поверхностей равной плотности с уровнями поверхностями полного потенциала. Конкретно для рассматриваемой двухкомпонентной модели речь идет о двух поверхностях, где происходит скачок плотности (это внешняя поверхность фигуры и поверхность раздела ядро—мантия).

Для внешней граничной поверхности S требование уравнивания приводит к условию пропорциональности выражений

$$A_i x_i^2 - \frac{\Omega^2}{2\pi G \rho_{\text{cp}}} \propto \frac{x_1^2}{a_1^2} + \frac{x_2^2}{a_2^2} + \frac{x_3^2}{a_3^2},$$

откуда следуют два равенства:

$$a_1^2 (A_1 - \frac{\Omega^2}{2\pi G \rho_{\text{cp}}}) = a_2^2 (A_2 - \frac{\Omega^2}{2\pi G \rho_{\text{cp}}}) = a_3^2 A_3. \quad (8)$$

Первое дает квадрат угловой скорости вращения как функцию отношений полуосей эллипсоида a_2/a_1 и a_3/a_1 , а второе в неявном виде связывает эти отношения полуосей между собой и описывает внешнюю форму модели.

Главное отличие нашей модели от классического эллипсоида Якоби состоит в том, что в ней величина $\Omega^2/2\pi G \rho_{\text{cp}}$ нормируется на введенную в (7) комбинированную плотность эллипсоида ρ_{cp} .

* Фокалоидом называется оболочка, ограниченная двумя софокусными эллипсоидами. Гравитирующий фокалоид обладает интересными свойствами. Так, при равномерном распределении вещества однородного фокалоида внутри этой оболочки внешний потенциал и сила притяжения не изменяются [1, 2].

Аналогичным образом находятся два других уравнения, обеспечивающих существование ур-венной поверхности на границе S' между ядром и оболочкой. Поскольку эти уравнения для ρ' и отношений a'_2/a'_1 и a'_3/a'_1 , описывающие вращение и форму ядра в модели, довольно громоздкие, мы их в явном виде здесь не приводим (см. [9]).

Численные расчеты

Подготовив математический аппарат, применим его к планете Хаумеа. Зная полуоси ее внешней поверхности S , вычисляем коэффициенты потенциала, а затем по первому равенству из (8) находим угловую скорость на внешней поверхности фигуры: $\Omega^2/2\pi G\rho_{cp} = 0.182134$. Подчеркнем, что при расчете угловой скорости на внутренней границе ледяной мантии необходимо знать толщину оболочки. Толщина слоя льда не может быть произвольной, и для ее нахождения следует приравнять среднюю плотность (7) к плотности, известной для Хаумеа из наблюдений. Это даст важное уравнение

$$\frac{a'_1 a'_2 a'_3}{a_1 a_2 a_3} = \frac{\rho_{cp} - \rho}{\rho' - \rho}, \quad (9)$$

которое связывает форму модели с ее внутренней структурой.

Теперь следует задать реальную плотность ядра и оболочки. Сделать это нетрудно: ядро у Хаумеа каменное, и его плотность (ρ') можно взять равной 3 г/см^3 , а плотность льда в оболочке (ρ) берем равной 1 г/см^3 . Небольшие вариации этих значений не могут сильно исказить ситуацию. Тогда уравнение (5) для эллипсоидальной координаты λ (с учетом указанного там же условия софокусности) примет вид

$$\frac{\sqrt{(a_1^2 - \lambda)(a_2^2 - \lambda)(a_3^2 - \lambda)}}{a_1 a_2 a_3} = 0.801146. \quad (10)$$

Численное решение этого кубического уравнения дает требуемый корень: в нормированном виде он будет равен 0.114. Подчеркнем, что это значение получено нами из условий равновесия планеты.

Далее, зная λ , находим отношение массы оболочки к массе ядра:

$$\frac{M_{об}}{M_{ядр}} = \left(1 - \frac{a'_1 a'_2 a'_3}{a_1 a_2 a_3}\right) \frac{\rho}{\rho'} = 0.0663. \quad (11)$$

Таким образом, масса оболочки составляет всего лишь 6.6% от массы каменного ядра. Между прочим, это значение почти в два раза меньше прежней оценки массы льда (11%) из [7]. В пользу нашего соотношения говорит то, что именно при нем период осевого вращения планеты Хаумеа будет равен наблюдаемому значению. Масса же самой оболочки оказывается тогда равной $M_{об} = 2.490 \cdot 10^{23} \text{ г}$.

Теперь, с известной координатой λ , находим важные геометрические характеристики ядра Ха-

Таблица
Геометрические параметры ядра Хаумеа

i	Параметр		
	a'_i/R	A'_i	\tilde{A}'_i
1	1.322964	0.402696	0.056469
2	1.002348	0.575913	0.096262
3	0.604563	1.021391	0.243883

умеа (табл.). Например, толщина оболочки льда на главных полуосях модели будет равна

$$\begin{aligned} b_1 &= a_1 - a'_1 \approx 30.37 \text{ км;} \\ b_2 &= a_2 - a'_2 \approx 39.64 \text{ км;} \\ b_3 &= a_3 - a'_3 \approx 63 \text{ км.} \end{aligned} \quad (12)$$

Как и должно быть для фокалоида, толщина оболочки льда меньше там, где больше полуось фигуры.

В итоге находим квадрат угловой скорости на поверхности каменного ядра S' : $\Omega'^2/2\pi G\rho_{cp} = 0.171010$, и разность вычисленных квадратов угловых скоростей в модели оказывается положительной. С физической точки зрения это означает, что рассматриваемая модель Хаумеа в целом не находится в строгом равновесии: в ней угловая скорость равновесного вращения внешней границы оказывается чуть больше угловой скорости равновесного вращения ядра. Другими словами, в данной модели внешняя поверхность S и поверхность раздела ядра и оболочки S' не могут одновременно быть *уровенными*. Из-за этого лед оказывает дополнительное тангенциальное поверхностное натяжение на каменное ядро. Эти обстоятельства важны для рассматриваемого далее процесса эволюции планеты Хаумеа.

На рис.5 показан график квадрата угловой скорости вращения для внешней границы модели

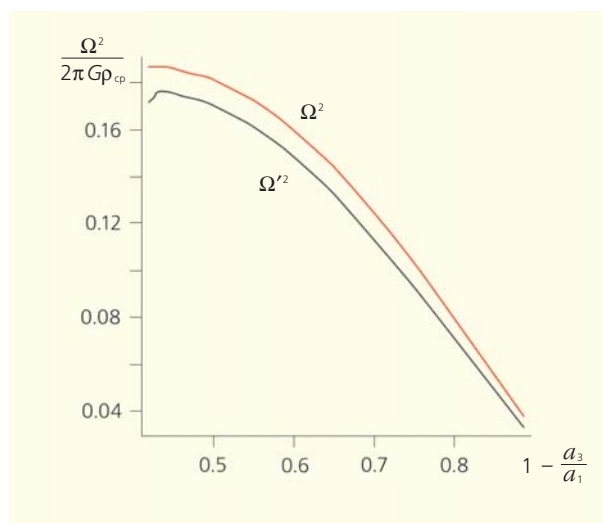


Рис.5. Зависимость величины квадрата угловой скорости для оболочки (верхняя кривая) и ядра (нижняя кривая) от меридионального сжатия внешней границы модели.

(верхняя кривая), а также величины, характеризующей равновесное вращение на границе раздела ядро—оболочка. Сформулируем некоторые выводы:

- именно при указанных (разных!) угловых скоростях та и другая поверхности в Хаумеа по отдельности (а не одновременно!) могут быть уровнями;

- угловая скорость вращения для верхней поверхности всегда чуть больше, чем для границы каменного ядра;

- разность угловых скоростей убывает вдоль последовательности фигур двухслойной модели.

Найденная разность угловых скоростей и объясняет работу релаксационного механизма в недрах Хаумеа.

Так откуда спутники?

Выше было установлено, что наложение эллипсоидального слоя льда на более плотное эллипсоидальное каменное ядро приводит к тому, что поверхность S' (на разделе льда и камня) и внешняя граничная поверхность планеты S одновременно не могут быть уровнями, так как угловая скорость вращения внешней границы планеты оказывается чуть больше (примерно на 6%) угловой скорости вращения ее ядра.

Поскольку строгого равновесия в модели не существует, вследствие указанного рассогласования возникнут дополнительные напряжения как в каменном ядре, так и в слое льда на поверхности планеты. Рассмотрим процесс накопления напряжений подробнее.

У эллипсоидов Якоби (рис.4) есть важное свойство, которое мы уже отмечали: если угловой момент вращения эллипсоида фиксирован, то чем медленнее фигура вращается, тем больше эллипсоид вытягивается в экваториальной плоскости (это свойство данной фигуры равновесия прямо следует и из формулы для ее углового момента вращения).

Найденная выше разность квадратов угловых скоростей позволяет оценить относительную деформацию ядра: $\Delta a_1/a_1 \approx 0.1$.

Итак, процесс релаксационного выравнивания угловых скоростей приведет к заметному (~10%) удлинению наибольшей оси ядра. В свою очередь, изменение формы ядра породит сдвиговые напряжения на границе каменного ядра и ледяной мантии. Накопление этих напряжений вызовет деформацию формы ледяной оболочки (рис.6). Поскольку разница угловых скоростей на поверхности фигуры и на границе ядра мала, все процессы релаксации внутри тела будут протекать медленно и почти квазиравновесно.

Рассмотрим последовательность этапов этой эволюции. Лед пластичнее камня, и на первом этапе устанавливается состояние, когда эквипотенциальной на какое-то время становится внешняя

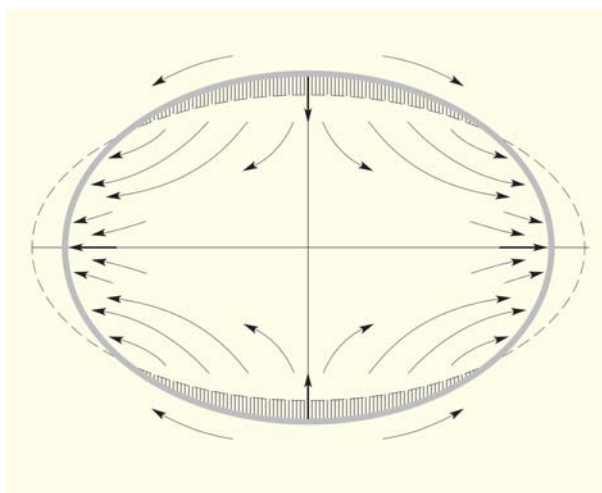


Рис.6. Схема строения Хаумеа. Серая оболочка изображает слой льда. Штрихами показано возможное изменение фигуры планеты при многократном воздействии внутренних растягивающих напряжений. Действие этих напряжений показано стрелками.

поверхность планеты. Однако на этом процесс эволюции не заканчивается, так как поверхность ядра еще не становится эквипотенциальной (для этого ядро должно вращаться чуть медленнее). По этой причине внутри планеты начинается второй этап релаксационных процессов, при которых ядро за счет малых изменений его моментов инерции чуть замедляет свое вращение. Но замедление вращения ядра планеты неизбежно приводит, по свойствам фигур равновесия, к его удлинению и накоплению во внешней ледяной оболочке касательных (к поверхности ядра) напряжений. Ледяная оболочка деформируется упруго только в малой степени, пока приложенные напряжения не достигают предела прочности, после этого происходит резкая перестройка льда в мантии. Так как выше мы нашли, что релаксационное изменение относительной длины большой полуоси ядра может достигать заметной величины — 10%, то в ходе эволюции указанная перестройка мантии могла происходить многократно. В результате на противоположных острых концах быстровращающегося вытянутого эллипсоида скапливались значительные массы льда. Именно квазиравновесное отделение этих масс от тела планеты и привело к образованию спутников планеты Хаумеа. Наша модель позволяет также оценить отношение массы известных ныне спутников к массе породившей их оболочки: $(m_1 + m_2)/M_{\text{оо}} = 0.079067 \approx 8\%$.

Таким образом, на образование двух спутников Хаумеа было затрачено только 8% массы ее ледяной оболочки.

Дальнейшая эволюция орбит спутников происходила под сильным приливным влиянием самой планеты. Внешний спутник Хиияка, имеющий большую массу, испытал и наибольшее приливное

влияние планеты, вследствие чего его орбита постепенно округлилась и он заметно (почти до 50 тыс. км) удалился от планеты. В этом процессе приливной эволюции часть углового момента вращения планеты передалась ее спутникам, сама же планета несколько замедлила свое вращение.

Как изначально вращалась планета?

Еще один интересный вопрос: как быстро вращалась планета Хаумеа в эпоху до отделения от нее спутников? Расчеты показали, что в настоящее время полный угловой момент планеты $L_t = 6.0715 \cdot 10^{36} \text{ г} \cdot \text{см}^3/\text{с}$, а присоединение спутников лишь немного увеличивает этот момент: $L_t/(L_{\text{ядр}} + L_{\text{об}}) = 1.130723$.

Зная это, можно найти период вращения планеты Хаумеа, который она имела до отделения спутников. Этот период оказывается примерно на 16 мин меньше нынешнего и составляет примерно 3.64 ч. Кроме того, находим, что в эпоху до отделения спутников планета имела $\Omega^2/2\pi G \rho_{\text{ср}} \approx 0.184$. Интересно заметить, что данная величина чуть меньше максимально возможного для эллипсоидов Якоби значения квадрата угловой скорости $\Omega^2/2\pi G \rho_{\text{ср}} \approx 0.187115$.

Этот вывод служит дополнительным аргументом в пользу того, что планета Хаумеа и в раннюю эпоху, до отделения спутников, находилась в квазиравновесном состоянии.

Суммируя сказанное

Карликовая планета Хаумеа уникальна, так как представляет единственный известный в природе пример, когда конфигурация (по неизвестным пока причинам) ушла с последовательности сжатых сфероидов Маклорена и обосновалась на последовательности трехосных эллипсоидов. Анализ

таких фигур равновесия связан с математическими трудностями, ведь бифуркация эллипсоидов Якоби происходит не от сферы, а от сильно сжатого сфероида Маклорена.

Построенная здесь динамическая модель планеты Хаумеа отличается от классического эллипсоида Якоби и представляет собой неоднородную фигуру равновесия гравитирующей деформируемой массы, которая имеет дополнительные поверхностные (но не молекулярные, как в обычной жидкости!) натяжения за счет лежащего на поверхности камня ледяного слоя.

Квазиравновесный механизм отделения от планеты спутников основывается на тонких свойствах трехосных фигур равновесия. Сам механизм выстраивается на учете релаксационных процессов, при которых границы ядра и мантии стремятся стать эквипотенциальными. При этом происходят малые приращения экваториальных моментов инерции и каменное ядро чуть замедляет свое вращение. Одновременно в мантии накапливаются касательные (к поверхности ядра) напряжения. Когда последние достигают критического уровня, стадия упругой деформации слоя льда заканчивается и происходит перераспределение вещества в ледяной оболочке. Процессы таких сломов повторялись многократно, и на острых концах быстровращающегося эллипсоида скапливались значительные избытки масс льда, которые затем квазиравновесно отделились от тела планеты. Из этих отделившихся масс льда и образовались спутники планеты Хаумеа.

Модель также предсказывает, что спутники в своем движении не должны сильно отклоняться от плоскости экватора Хаумеа. Это согласуется с наблюдениями, однако противоречит гипотезе ударного образования спутников.

Данный механизм может применяться для изучения эволюции формы других планет и спутников, имеющих (или имевших в прошлом) ледяную оболочку. ■

Литература

1. Кондратьев Б.П. Динамика эллипсоидальных гравитирующих фигур. М., 1989.
2. Кондратьев Б.П. Теория потенциала и фигуры равновесия. М.; Ижевск, 2003.
3. Кондратьев Б.П. Теория потенциала. Новые методы и задачи с решениями. М., 2007.
4. Пицетти П. Основы механической теории фигуры планет. М.; Л., 1933.
5. Тодхантер И. История математических теорий притяжения и фигуры Земли. М., 2002.
6. Чандрасекар С. Эллипсоидальные фигуры равновесия. М., 1973.
7. Brown M.E., Bouchez A.H., Rabinowitz D.L. et al. Keck Observatory laser guide star adaptive optics discovery and characterization of a satellite to the large Kuiper Belt object 2003 EL61 // ApJ (Let.). 2005. V.632. P.L45–L48.
9. Kondratyev B.P. The near-equilibrium figure of the dwarf planet Haumea and possible mechanism of origin of its satellites // Astrophysics and Space Science. 2016. V.361. №5. Article 169.
10. Rabinowitz D.L., Barkume K., Brown M.E. et al. Photometric observations constraining the size, shape, and albedo of 2003 EL61, a rapidly rotating, Pluto-sized object in the Kuiper Belt // ApJ. 2006. V.639. P.1238–1251.
11. Ragozzine D., Brown M.E. Orbits and masses of the satellites of the dwarf planet Haumea (2003 EL61) // Astron. J. 2009. V.137. P.4766–4776.

Можно ли размягчить жесткий полимер?

А.Л.Волынский

Все линейные аморфные полимеры могут находиться по крайней мере в двух важнейших состояниях: стеклообразном и высокоэластическом, у каждого из которых есть своя область практического использования. Высокоэластические (каучукоподобные) полимеры служат основой для автомобильных, авиационных и велосипедных шин; без них невозможно обойтись при создании разного рода поглотителей вибрации, уплотнителей для монтажа стекол в транспорте и жилых домах и при решении множества других, менее масштабных задач, ставящих целью сделать нашу жизнь более комфортной. Не менее популярны и полимеры, находящиеся в стеклообразном состоянии: на их базе производят многие текстильные изделия; прочно вошли в обиход органические стекла, разного рода композиционные материалы для корпусов (например, холодильников), для многих деталей авиалайнеров, автомобилей и т.д. и т.п. И во всех этих приложениях первую скрипку играют уникальные механические свойства полимеров.

Механика упругости

Механические характеристики полимеров удобно иллюстрировать с помощью так называемых кривых растяжения. Эти



Александр Львович Волынский, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — структура и механика полимеров. Постоянный автор журнала «Природа».

Ключевые слова: полимеры, стеклообразное состояние, тепловое старение.
Key words: polymers, glassy state, thermal aging.

кривые получают, растягивая образец полимера и измеряя при этом напряжение, которое возникает в нем в результате деформации (затем нагрузку снимают и наблюдают за сжатием образца). На рис.1 схематически представлены такие зависимости для стеклообразного и каучукоподобного полимеров. Стрелки показывают, какая ветвь соответствует изменению размеров образца при его нагружении (деформация возрастает), а какая — при снятии напряжения. Отметим принципиальные черты, характерные для двух состояний. Каучукоподобные полимеры имеют очень низкие модули упругости и прочность (это минус), но обладают уникальным

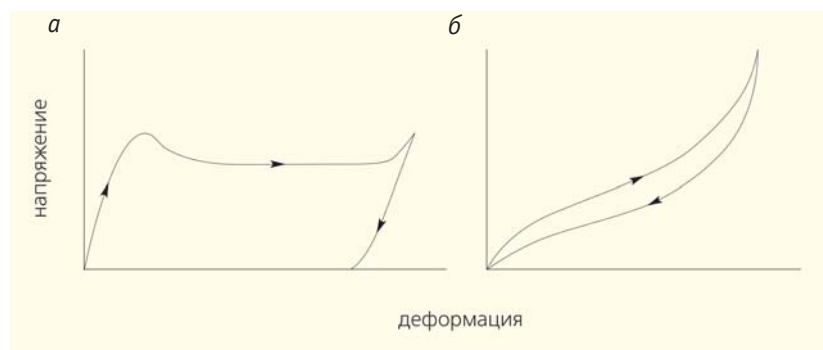


Рис.1. Кривые растяжения стеклообразного (а) и каучукоподобного (б) полимеров.

свойством (ни один другой материал не может его продемонстрировать) — способностью к большим обратимым деформациям (это огромный плюс). Стеклообразный полимер также способен к большим деформациям, приводящим к взаимной ориентации составляющих его макромолекул. Однако эта деформация оказывается необратимой, что позволяет ориентированному полимеру сохранять высокие механические показатели и служить основой для изготовления весьма прочных продуктов, таких, например, как полимерные пленки или волокна.

Важно отметить, что деформация стеклообразного полимера (и, кстати, кристаллического — такая структурная форма тоже существует) происходит при значительно более высоком напряжении, чем это имеет место в аналогичных условиях для каучукоподобного полимера. Максимум на кривой растяжения стеклообразного или кристаллического полимера соответствует моменту возникновения в нем так называемой шейки — сужения, в котором макромолекулы оказываются взаимно ориентированными [1]. Каучукоподобный полимер деформируется при значительно меньших напряжениях, и изменение его геометрических размеров происходит однородно. Еще раз подчеркнем, что в последнем случае деформация обратима, т.е. после снятия напряжения полимер очень быстро и полностью восстанавливает свои размеры.

Возникает вопрос: а в чем, собственно, разница между стеклообразным и каучукоподобным состояниями полимера, состоящего в обеих формах из одних и тех же молекул? Иначе говоря, как и почему конкретный полимер может превратиться из органического стекла в каучук и наоборот? Оказывается, что любой аморфный полимер легко переводится из стеклообразного состояния в высокоэластическое простым нагреванием выше так называемой температуры стеклования (T_g). Подробнее этот вопрос мы рассмотрели ранее в статье [2], где и содержатся ответы на сформулированные вопросы.

Казалось бы, вынесенный в заголовок вопрос имеет простой и очевидный ответ: чтобы размягчить жесткий, стеклообразный, полимер, достаточно его нагреть выше температуры стеклования — и все. Однако на практике реализовать это не так просто. Во многих случаях перевод полимера из стеклообразного состояния в высокоэластическое требует его значительного нагревания. Температура стеклования, например, полистирола составляет 100°C , а поликарбоната — 145°C . Обеспечивать подобный нагрев далеко не всегда удобно и возможно. Здесь мы рассмотрим круг вопросов, связанных с приданием стеклообразным и кристаллическим полимерам свойств, которые характерны для каучукоподобного состояния, без нагревания материалов выше соответствующих температур плавления (T_m) и стеклования.

Мягкость без нагрева

Отмеченное выше различие в механических свойствах стеклообразного/кристаллического и каучукоподобного полимеров связано с особенностями их молекулярного движения выше и ниже T_g . Поскольку в деталях о поведении молекул мы уже рассказывали [2], отметим лишь главные особенности этого различия. Выше T_g макромолекулы имеют высокую степень свободы, благодаря чему они под действием теплового движения могут принимать наиболее энергетически выгодную, «удобную» для себя форму (конформацию). Именно поэтому растянутая резинка, в которой макромолекулы оказываются взаимно ориентированными (неудобное для них состояние), самопроизвольно восстанавливает свои размеры. В стеклообразном и кристаллическом состояниях макромолекулы такой свободы не имеют, поэтому растянутый полимер, в котором макромолекулы взаимно ориентированы, не может самопроизвольно принять наиболее удобную форму для своих макромолекул и остается в ориентированном состоянии (рис.1).

Казалось бы, все понятно. Выше и ниже T_g условия для молекулярного движения в полимерах оказываются разными, почему мы и наблюдаем указанные различия в механическом поведении деформированного полимера. Однако неожиданно выяснилось, что каучукоподобные свойства могут демонстрировать полимеры, находящиеся при температуре значительно ниже T_g . В качестве примера рассмотрим данные статьи [3] (рис.2). Авторы этой работы инициировали в образце стеклообразного полимера поликарбоната (имеющего $T_g = 145^\circ\text{C}$) образование единичного крейза

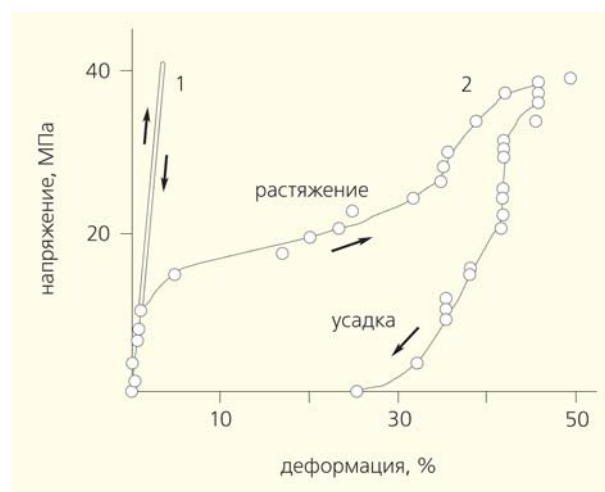


Рис.2. Кривые растяжения и сокращения с постоянной скоростью исходного, монолитного поликарбоната (1) и образца поликарбоната, содержащего единичный крейз (2), до напряжения 42 МПа. Деформацию проводили при комнатной температуре [3].

(полоски, в которой структурная организация меняется — молекулы выстраиваются вдоль одного направления и собираются в своего рода тончайшие нити, о чем мы говорили в статье [4]). Затем образец подвергался растяжению при комнатной (т.е. значительно ниже T_g) температуре. Как следует из рис.2, введение крейза в стеклообразную матрицу резко изменяет механическое поведение полимера в целом. Предел текучести, характеризующий начало отклонения от линейной, гуконской, зависимости, у материала с крейзом становится примерно в три раза меньше такового у исходного, недеформированного, полимера. Более того, такой образец, показывает значительную обратимую деформацию (усадку) после снятия напряжения, что совершенно нехарактерно для стеклообразного состояния.

Итак, введение некой неоднородности в виде крейза в структуру стеклообразного полимера резко изменяет его поведение. Продemonстрируем это обстоятельство на другом примере. Одним из самых распространенных и широко используемых полимеров по праву является полистирол (ПС). Он обладает низким влагопоглощением, высокой влажностойкостью и морозостойкостью. Полистирол имеет отличные диэлектрические свойства, нерастворим в воде, легко формуется и окрашивается, хорошо обрабатывается механическими способами и склеивается. К тому же он отличается легкостью и дешевизной приготовления. Однако у столь привлекательного полимера есть один, но очень серьезный недостаток — это хрупкий материал. При комнатной температуре он разрушается, если его растянуть всего лишь на 1–3%.

Неудивительно поэтому, что химики и технологи уже давно (с первой половины XX в.) пытаются каким-либо образом уменьшить хрупкость ПС, т.е. сделать его мягким, пластичным, чтобы расширить области практического использования. Одной из таких успешных попыток стала полимеризация стирола (мономера для изготовления ПС) с добавлением небольшого количества мягкого каучукообразного полимера — полибутадиена (ПБ). Поскольку в макромолекуле ПБ содержатся двойные связи, мы в этом случае осуществляем, по сути, привитую сополимеризацию стирола с ПБ. Несмотря на то что мягкого компонента (ПБ) в таком сополимере, как правило, немного (не более 5–10 %), этого количества вполне хватает, чтобы решительно изменить механическое поведение полистирола, и в первую очередь избавить его от хрупкости. По этой причине получаемый в результате указанной реакции продукт получил название ударопрочного полистирола (УПС) [5].

На рис.3 представлены кривые растяжения ПС и УПС. Хорошо видно, что чистый ПС, как было отмечено выше, разрушается при малых деформациях (1–3%), в то время как УПС может деформироваться в условиях растяжения на 40 и более процентов, т.е. неприятное свойство ПС (хруп-

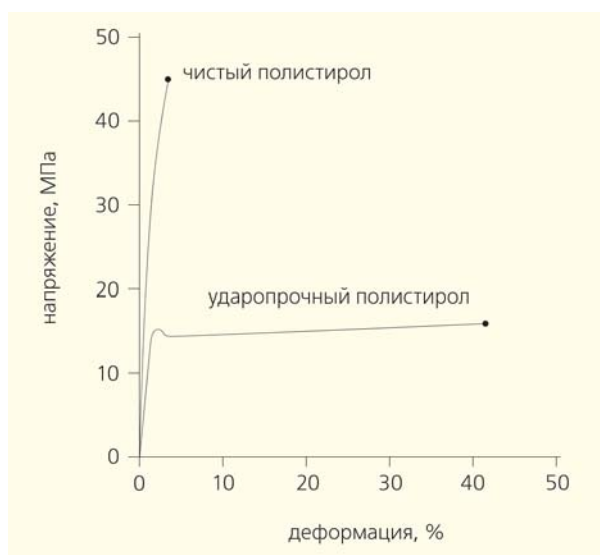


Рис.3. Кривые растяжения полистирола и ударопрочного полистирола при комнатной температуре [5].

кость) полностью утрачивается. Полимер после введения в него добавки ПБ действительно делается мягким и пластичным. Более того, если растянутый на 30 и более процентов УПС освободить из зажимов растягивающего устройства, полимер демонстрирует значительную усадку, совершенно нехарактерную для стеклообразного состояния, в котором находится чистый ПС при комнатной температуре (рис.4). Хорошо видно, что, во-первых, УПС можно растянуть на несколько десятков процентов при комнатной температуре и что, во-вторых, снятие напряжения приводит к значительной усадке полимера, несвойственной для стеклообразного состояния (сравните рис.1 и рис.4). Возникает вопрос: каким образом незначительное количество добавленного ПБ столь сильно изменяет механическое поведение результирующего продукта?

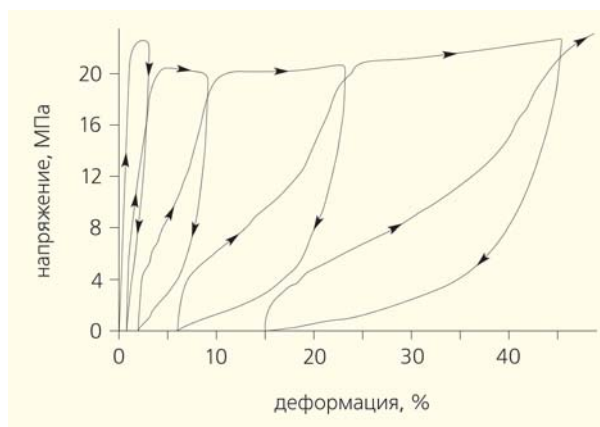


Рис.4. Циклические кривые растяжения ударопрочного полистирола [3].

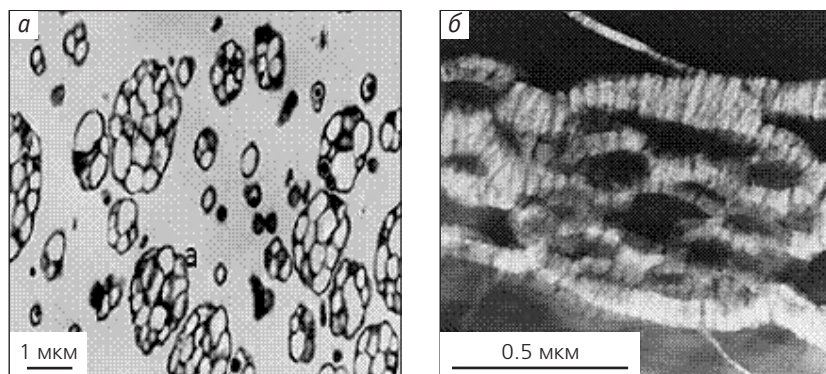


Рис.5. Электронные микрофотографии ударопрочного полистирола до (а) и после (б) деформации на воздухе [6].

Структурные исследования позволяют ответить на этот вопрос. ПС и ПБ, как и большинство полимерных пар, несовместимы, и потому при реакции сополимеризации стирола и ПБ происходит процесс фазового разделения. Однако это разделение осуществляется весьма своеобразно.

Выделившийся в отдельную фазу ПБ образует небольшие включения в непрерывной полимерной матрице (рис.5,а). Указанные включения содержат значительные количества ПС и однородно распределены в его объеме. Если мы будем деформировать чистый ПС (рис.3), неизбежно возникающий при этом, как и в любом деформируемом твердом теле, дефект (концентратор напряжения) будет разрастаться и приведет к макроскопическому разрушению образца. Наличие в УПС множества мелких включений (рис.5,а), однородно распределенных в материале, препятствует образованию одного такого опасного дефекта. Вместо этого непрерывная ПС-матрица начинает сама неупруго (пластически) деформироваться между указанными включениями. Зоны такого деформированного материала на рис.5,б видны как темные полосы, соединяющие соседние каучуковые включения. Такого рода зоны пластически деформированного полимера имеют микропористую структуру (собственно, это и есть крейзы). Создание таких высокодисперсных образований требует затрат значительной механической работы, что мы и наблюдаем в эксперименте. Работа деформации характеризуется площадью под кривой растяжения (рис.3), и нетрудно убедиться: указанная работа в случае деформации УПС на несколько порядков больше, чем при деформировании чистого ПС.

Таким образом, инициирование особых зон пластически деформированного материала в стеклообразном полимере (крейзов) резко изменяет его механические свойства. Материал делается мягким, пластичным даже при температурах значительно ниже его температуры стеклования, что позволяет, в частности, существенно расширить области его практического использования.

В условиях жесткого порядка

Итак, существует способ размягчения стеклообразных полимеров. Возникает вопрос: а можно ли подвергнуть размягчению кристаллический полимер? Вообще говоря, кристаллизация полимера, как правило, делает его более прочным и более жестким. Именно по этой причине сегодня удастся использовать кристаллические полимеры для изготовления, например, деталей машин, в частности шестерен и даже бронезилетов.

Тем не менее в начале 70-х годов прошлого века было обнаружено, что кристаллические полимеры, такие как полипропилен, полиэтилен высокой плотности, поливинилиденфторид, полиамид-6,6, поли-4-метилпентен-1, полиамид-11 и др., могут демонстрировать совершенно неожиданные свойства. Ориентированные в особых условиях кристаллические полимеры, имеющие достаточно высокий модуль упругости, удавалось растягивать на десятки и даже сотни процентов. Но самое удивительное заключалось в том, что после такого растяжения при снятии напряжения растянутые кристаллические полимеры самопроизвольно практически полностью восстанавливают свои размеры при температуре опыта. Другими словами, они демонстрируют большую обратимую деформацию. Типичный пример такого рода представлен на рис.6 [7].

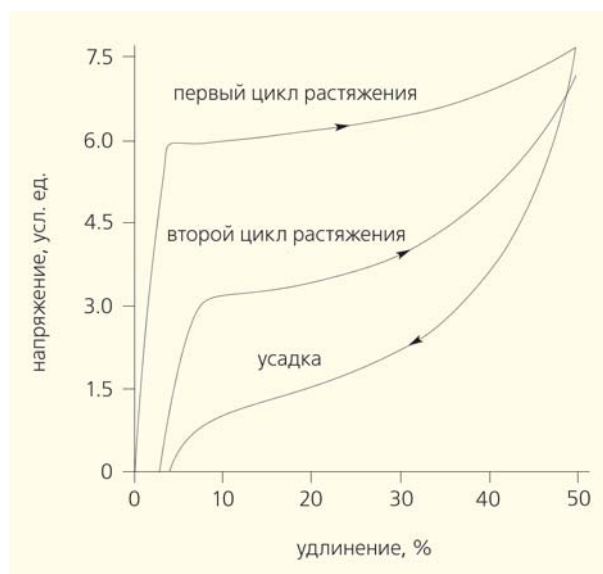


Рис.6. Типичная кривая растяжения и усадки ламеллярного (жестко-эластичного) полипропилена при комнатной температуре [7].

Из этого рисунка следует, что в первом цикле деформации полимер имеет кривую растяжения, характерную для кристаллического полимера (начальный прямолинейный участок, предел текучести, область плато). Однако после снятия напряжения образец самопроизвольно сокращается практически до исходных размеров и в последующих циклах растяжения показывает механическое поведение, характерное для каучукообразного полимера (низкий модуль упругости, монотонно растущее напряжение). Иначе говоря, в кристаллическом полимере обнаруживается выраженный эффект деформационного размягчения, полностью аналогичный рассмотренному выше для аморфных стеклообразных полимеров. В дальнейшем материалы, сочетающие в себе свойства жестких кристаллических полимеров и каучукоподобных материалов, были названы жестко-эластичными (hard elastic fibers, films), поскольку их свойства находятся в контрасте с давно и хорошо известными свойствами высокоориентированных кристаллических полимеров, которые имеют большой модуль упругости, высокую прочность и малую деформируемость.

Способность к проявлению столь необычных для ориентированных кристаллических полимеров свойств обусловлена их специфической структурой. Эта структура может быть представлена как множество регулярно расположенных (параллельных друг другу) кристаллических ламелей (темные полосы на рис.7,а). Кристаллические ламели разделены так же регулярно расположенными аморфными прослойками (светлые полосы на рис.7,а) [8]. Описанный выше эффект деформационного размягчения (рис.б) проявляется в том случае, если растяжение жестко-эластичного материала производят в направлении, нормальном плоскости ламелей.

В результате такого растяжения кристаллические ламели удаляются друг от друга, а между ними возникают тонкие тяжи (фибриллы) ориентированного полимера (рис.7,б). Можно сказать, что при растяжении таких

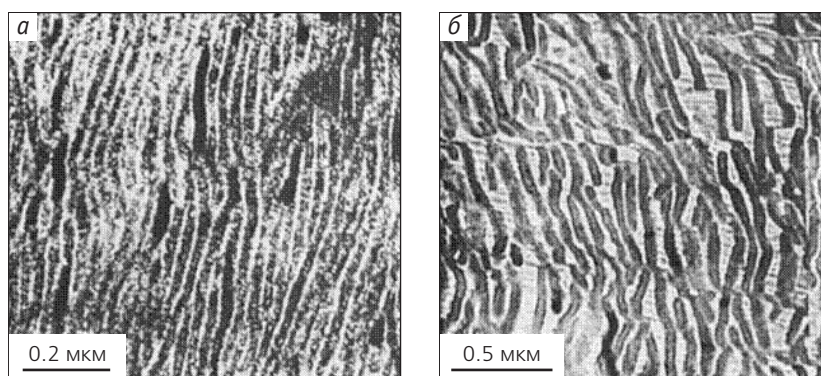


Рис.7. Структура жестко-эластичного полиэтилена до (а) и после (б) его растяжения на 100% [8]. Ось растяжения горизонтальна.

материалов образуется крейзоподобная структура, аналогичная той, которая наблюдается в крейзованных стеклообразных полимерах.

Это удивительное сходство было отмечено во многих работах, и в частности в [9]. Схематически структурное сходство и сходство в механическом поведении сопоставлены на рис.8, из которого следует, что близость структуры деформирован-

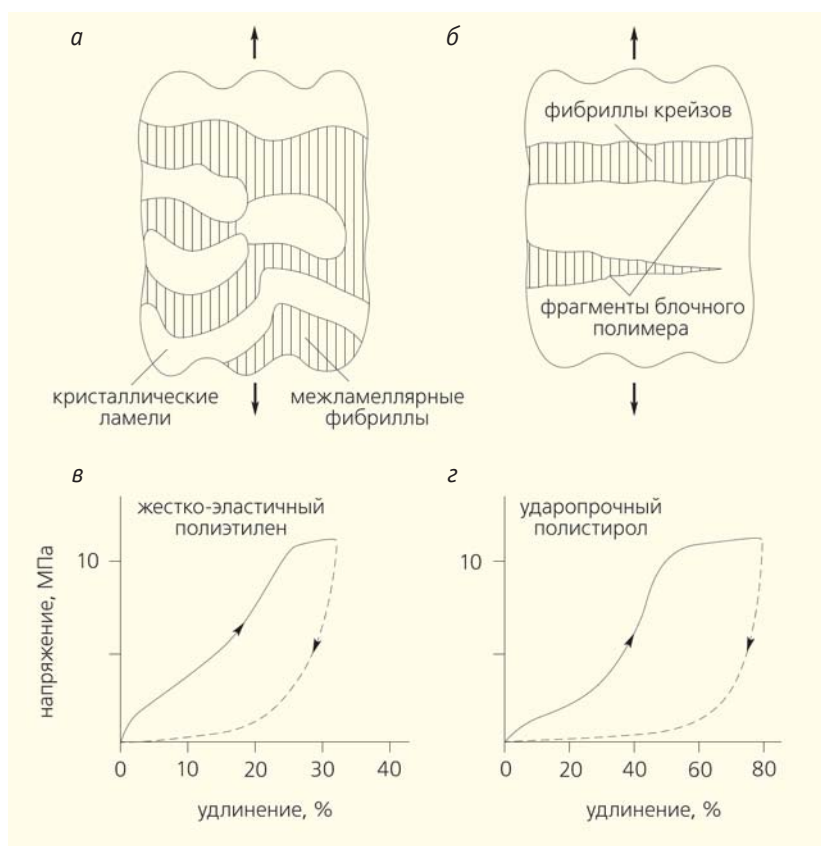


Рис.8. Схематическое изображение структуры деформированного жестко-эластичного полимера (а) и крейзованного стеклообразного полимера (б) и кривые растяжения и усадки предварительно деформированных жестко-эластичного волокна полиэтилена высокой плотности (г) и ударопрочного полистирола (в) [9].

ных стеклообразных и кристаллических полимеров обуславливает и удивительную аналогичность в их механическом поведении — в обоих случаях наблюдается выраженное деформационное размягчение и большая обратимость их деформации. Как кристаллический (рис.8,в), так и стеклообразный (рис.8,г) полимер практически полностью восстанавливает свои размеры после деформации и снятия нагрузки. Напомним, что такое механическое поведение совершенно нехарактерно для полимеров, находящихся в кристаллическом или стеклообразном состоянии. Важное значение имеет то обстоятельство, что фибриллярные нанометровые агрегаты макромолекул, связывающие кристаллические ламели в жестко-эластичном полимере (рис.8,а) и фрагменты неориентированного стеклообразного полимера (рис.8,б), разобщены в пространстве микропустотами также нанометрового размера.

В чем механизм?

Итак, введение в полимер крейзов (в случае стеклообразного полимера) или крейзоподобной структуры (в случае кристаллического полимера) приводит к кардинальному изменению механических свойств материала. Это изменение выражается, во-первых, в деформационном размягчении полимера и, во-вторых, в появлении у него способности к большой обратимой деформации. В итоге стеклообразный и кристаллический полимеры проявляют механическое поведение, характерное для высокоэластического состояния, в температурном интервале, намного более низ-

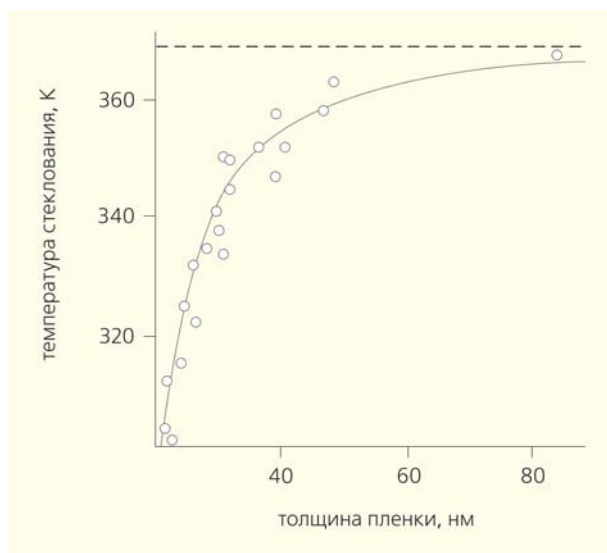


Рис.9. Зависимость температуры стеклования пленок полистирола от их толщины. Пунктирная линия показывает температуру стеклования блочного монолитного полистирола [10].

ком, чем их соответствующие температуры стеклования или плавления.

Возникает вопрос о механизме наблюдаемых явлений. Понять сформулированное противоречие удастся, если учесть открытую в середине 90-х годов прошлого века зависимость температуры стеклования от размера полимерной фазы. Столь фундаментальная характеристика, как температура стеклования, оказалась не постоянной для полимеров величиной (рис.9). Из рисунка следует, что указанная во всех справочниках температура стеклования начинает стремительно снижаться, когда толщина полимерной пленки становится меньше 70–80 нм. Величина такого понижения T_g может достигать многих десятков и даже сотен градусов. Зависимость, представленная на рис.9, имеет важное практическое значение. Химик-технолог обязательно должен знать, какова температура стеклования полимера, который он выбирает для решения тех или иных практических задач. Но ориентация на значение T_g , которое можно взять из справочника (пунктирная линия на рис.9), приведет к серьезным ошибкам в том случае, если используемый полимер измельчен до наносостояния.

Размер полимерной фазы имеет решающее значение для понимания механизма деформационного размягчения полимеров, который был подробно рассмотрен выше. Дело в том, что размеры фибриллярных агрегатов макромолекул в структуре жестко-эластичного полимера (рис.8,а) и в структуре крейзов стеклообразного полимера (рис.8,б) имеют диаметр 5–10 нм. Это означает, что фибриллы, соединяющие фрагменты стеклообразного полимера в крейзах, и фибриллы, соединяющие ламеллярные кристаллы в жестко-эластичных полимерах, находятся в каучукоподобном состоянии, т.е. промежутки между массивными фрагментами в обоих случаях заполнены тончайшими резиновыми тяжами. Поскольку эти зоны, заполненные фибриллизированным полимером, пересекают (перколируют) все сечение полимера, неудивительно, что такой материал демонстрирует при повторных деформациях выраженный эффект деформационного размягчения и большую обратимую деформацию. Такое поведение обусловлено по сути тем, что в блочный жесткий (стеклообразный или кристаллический) полимер при его деформации поступает расстеклованный компонент, в результате чего образуется своего рода гибридный композит, сочетающий в себе свойства твердого, жесткого (стеклообразного или кристаллического) и мягкого, податливого (каучукоподобного) компонентов.

* * *

Таким образом, эффект деформационного размягчения, имеющий место в стеклообразных и кристаллических полимерах, позволяет в широких пределах изменять (регулировать) их механические свойства, что, очевидно, имеет несомнен-

ное прикладное значение. Кроме того, перевод полимера в фибриллизованное состояние в структуре крейзов или жестко-эластичных полимеров (рис.8) означает создание высокоразвитой нанопористой структуры. Действительно, фибриллы здесь разобщены в пространстве и разделены микропустотами размером в единицы — десятки нанометров. Придание полимерам наноразмерной пористости имеет внушительный прикладной потенциал. По сути, крейзованные или деформированные жестко-эластичные полимеры — готовые полимерные сорбенты и/или мембраны. Такого рода объекты широко используются, например для очистки разного рода сточных вод, опреснения воды, извлечения из растворов ценных элементов. Обычно получать мембраны и сорбенты сложно, а часто и дорого, в нашем же случае достаточно всего лишь подвергнуть полимерную пленку или волокно деформации растяжения.

Благодаря крейзованным или жестко-эластичным материалам удастся также решить более общую задачу модификации свойств полимеров, когда у материала требуется сочетать пластичность, деформируемость, химическую стойкость и др. с одной стороны, и такие качества, как электропроводность, негорючесть, бактерицидность и пр., — с другой. Для этого в полимер вводятся специальные добавки, которые бывают совместимыми и несовместимыми. Первые ввести легко: они представляют собой некий «растворитель» для данного полимера, самопроизвольно проникают в него и однородно распределяются по объему, образуя истинный раствор. Но при этом резко снижаются твердость, прочность, устойчивость к механическим воздействиям и т.п. — придав полиме-

ру необходимые функциональные свойства (например, способность проводить ток), мы не сможем изготовить из него какой-либо полезный продукт (ту же пленку или волокно) с приемлемыми механическими показателями. А если приходится использовать несовместимые добавки, серьезные проблемы начинаются уже на этапе их введения: такие компоненты «не хотят» проникать в полимер — этому препятствуют поверхностные силы. Так, при перемалывании добавки вместе с полимером в смесителе она собирается в достаточно протяженные, хаотически распределенные включения в объеме полимера, не давая достичь высокой взаимной дисперсности. Из образующейся неоднородной, дефектной смеси вновь нельзя сделать материал с нужными механическими свойствами.

Отмеченные трудности преодолеваются при создании нанокомпозитов, представляющих собой непрерывную полимерную матрицу, в объеме которой однородно распределена несовместимая функциональная добавка, измельченная до наносостояния. Вообще-то получить нанокомпозиты тоже не просто, но тут на помощь и приходят крейзинг и деформация жестко-эластичных полимеров. После воздействия деформации растяжения в таких объектах самопроизвольно возникает фибриллярная нанопористая структура — желанная матрица; для приготовления необходимого нанокомпозита достаточно просто наполнить ее функциональной модифицирующей добавкой. Именно так был расширен круг нанокомпозитов с полимерной матрицей: получены новые виды полимер-полимерных наносмесей, негорючие и электропроводящие полимерные нанокомпозиты, металлополимеры и ряд других материалов [11].■

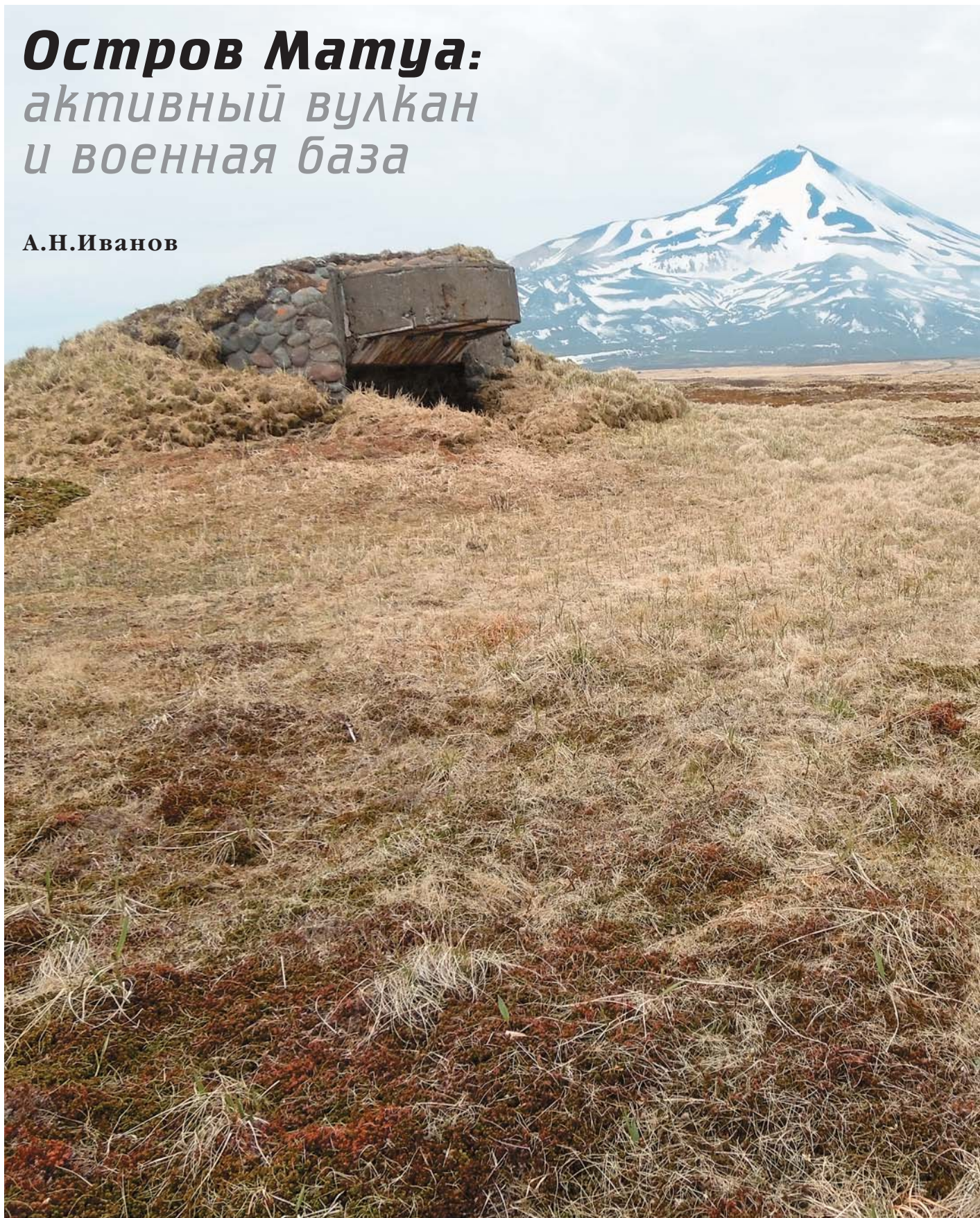
Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 14-03-00617-а и 15-03-03430-а) и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущей научной школы (НШ-1683.2014.3).

Литература

1. Кулезнев В.Н., Шершнев В.А. Химия и физика полимеров. М., 2007.
2. Волынский А.Л. Зависят ли свойства полимеров от их объема? // Природа. 2015. №2. С.3–13.
3. Kambour R.P. A review of crazing and fracture in thermoplastics // J. Polymer. Sci.: Macromolecular Reviews. 1973. V.7. P.1–154.
4. Волынский А.Л. Эффект Ребиндера в полимерах // Природа. 2006. №11. С.11–18.
5. Kinloch A.J., Young R.J. Fracture behaviour of polymers. Dordrecht: Springer Science; Business Media, 1995.
6. Bucknall C.B. Applications of microscopy to the deformation and fracture of rubber-toughened polymers // J. Microsc. 2001. V.201. Pt.2. P.221–229.
7. Sprague B.S. Relationship of structure and morphology to properties of «hard» elastic fibers and films // J. Macromol. Sci. Part B: Phys. 1973. V.B8(1–2). P.157–187.
8. Miles M., Petermann J., Gleiter H. Structure and deformation of polyethylene hard elastic fibers // J. Macromol. Sci. Part B: Phys. 1976. V.12. №4. P.523–534.
9. Miles M.J., Baer E. Hard elastic behaviour in high-impact polystyrene // J. Mater. Sci. 1979. V.14. P.1254.
10. Forrest J.A., Dalnoki-Veress K. The glass transition in thin polymer films // Adv. Colloid and Interface Sci. 2001. V.94. P.167–195.
11. Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф. Роль поверхностных явлений в структурно-механическом поведении твердых полимеров. М., 2014.

Остров Матуа: *активный вулкан и военная база*

А.Н.Иванов





Беллигеративно-вулканический ландшафт о.Матуа.
Здесь и далее фото автора



Андрей Николаевич Иванов, кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — островное ландшафтоведение, структурно-функциональная организация геосистем, особо охраняемые природные территории.

Ключевые слова: остров Матуа, Пик Сарычева, извержение, природно-территориальные комплексы, военная инфраструктура.
Key words: Matua Island, Sarychev Peak, eruption, natural territorial complexes, military infrastructure.

Курильская островная дуга — уникальный объект для изучения природных геосистем, существующих в условиях активного вулканизма. Эти острова служат своеобразными природными лабораториями, где можно наблюдать за развитием биосферы на контакте двух литосферных плит, в зоне с очень высокой интенсивностью вещественно-энергетических потоков.

Среди десятков самобытных островов Курильской гряды есть несколько особенных, выделяющихся примечательной природой, необычной историей или же и тем и другим. Один из них — о.Матуа, расположенный в средней части Курил. Здесь находится активный современный вулкан — Пик Сарычева. Кроме того, остров известен сохранившимися на нем фортификационными сооружениями времен Второй мировой войны, а также ореолом таинственности, окружающим многочисленные японские надземные и подземные военные объекты [1].

В мае–июне 2016 г. на Матуа работала экспедиция, организованная совместно Русским географическим обществом и Министерством обороны РФ. Полученные данные позволяют нам узнать, как влияет современный вулканизм на природу острова, а также внимательно рассмотреть рукотворное наследие японского периода колонизации острова.

Природа острова

Вулканическая постройка о.Матуа находится на поверхностях надводных и подводных морских террас, срезающих вершину огромного вулканоида с размером подводного основания 30×40 км и объемом 1200 км³ [2]. Он относится к типу Сомма-Везувий (молодой вулкан вложен в разрушенную постройку древнего, более крупного). В роли старого вулкана — соммы — выступает древний вулкан Матуа. Около 11.5 тыс. лет назад произошло его извержение, в результате которого образовалась кальдера размером 3.5×5 км [3]. В настоящее время она заполнена и в значительной степени перекрыта продуктами деятельности более молодого конуса — Пика Сарычева. Этот стратовулкан возник всего 400–600 лет назад и считается одним из самых активных на Курильских о-вах. Только за период с середины XVIII в. по настоящее время достоверно известно не

© Иванов А.Н., 2017



Вулкан Пик Сарычева на о.Матуа.



Карта-схема природно-территориальных комплексов о.Матуа (географические местности).

менее чем о 10 его извержениях [4]. При этом Пик Сарычева — единственный вулкан Курильской дуги, сектор пеплопада которого выходит далеко за пределы островной гряды. Пепел выпадал на Камчатке, на территории Хабаровского края и Сахалина. Современные извержения вулкана отличаются высокой эксплозивностью, выбрасываемый обломочный материал формирует эруптивные тучи, пирокластические потоки и связанные с ними пирокластические волны [5].

Последнее крупное извержение Пика Сарычева произошло в июне 2009 года*.

Климат о.Матуа — морской умеренный, с прохладной и очень снежной зимой с частыми метелями и аномально холодным летом [7]. Нигде больше в географической оболочке в равнинной части суши на этой широте нет таких низких летних температур. Основная причина того, что радиационный баланс на острове заметно ниже среднеширотного — высокая повторяемость облачности и туманов, характерная для морского климата. В наибольшей степени сокращения прихода солнечной радиации выражено в теплый период года, когда практически постоянно стоит пасмурная погода. Кроме того, сильное охлаждающее влия-

* Об этом событии, а также об экспедиции, посетившей остров после извержения, уже рассказывалось на страницах «Природы» [6].

ние оказывает прилегающая морская акватория: температура прибрежных вод летом обычно не превышает 6°C.

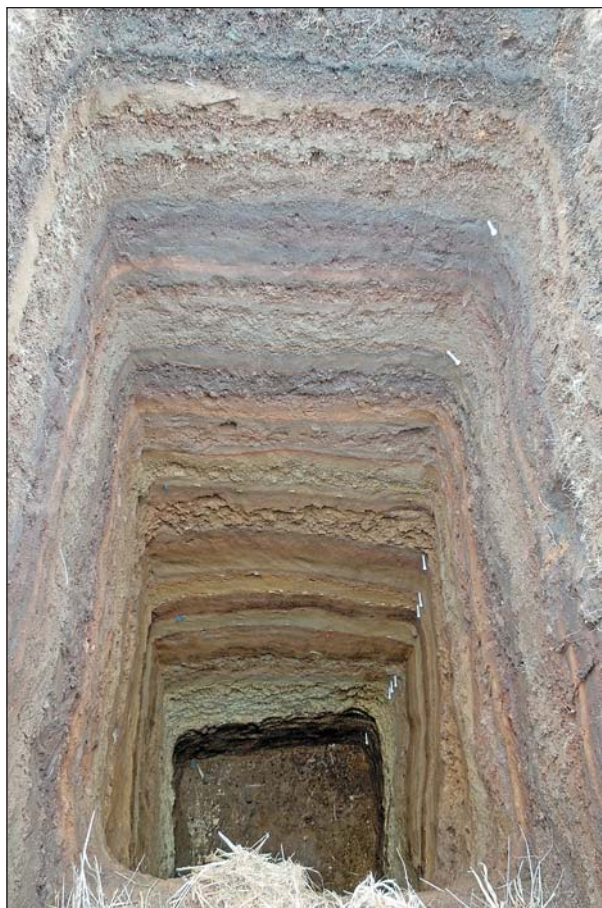
На Матуа за год выпадает 1223 мм осадков, но при этом здесь почти нет постоянных водотоков. Осадки фильтруются через мощную рыхлую толщу пирокластических отложений в глубинные слои. Этот фактор наряду с активным вулканизмом во многом обуславливает специфику островных почв. Частые извержения и грубый характер отложений с провальным режимом фильтрации приводят к тому, что на острове в качестве фоновых формируются своеобразные вулканические слоистые иллювиально-гумусовые почвы. Их отличительные черты — полигенетический профиль, слоистость, наличие многочисленных погребенных горизонтов, легкий механический состав, высокая водопроницаемость, глубокая миграция органических соединений [8].

Во флоре острова насчитывается 231 вид сосудистых растений, они относятся к 149 родам и 53 семействам [9]. В растительном покрове фон образуют три вида сообществ: луга, тундры и заросли ольхового стланика. Последние преобладают по площади на морских террасах и склонах кальдеры древнего вулкана, образуя почти непроходимые дебри. Выше 400 м над ур.м. они сменяются разреженными луговыми группировками и фрагментами горных тундр. Животное население, как и на других островах Курильской гряды, бедное. Наиболее заметный представитель наземной фауны — лисица обыкновенная. На береговых скалах часто встречаются гнездовые колонии морских птиц.

Ландшафтная структура

В геосистемной иерархии о.Матуа представляет собой природно-территориальный комплекс (ПТК) ранга *ландшафт*, внутри которого выделяются три местности — современных вулканических пустынь, древних вулканических построек вулкана Матуа и морских террас.

Местность вулканических пустынь сформирована вокруг вулкана Пик Сарычева и занимает около половины острова. В структуре местности абсолютно преобладают неполные ПТК без почвенно-растительного комплекса, представленные лавовыми потоками и пирокластическими отложениями. После извержения 2009 г. кратер вулкана имеет глубину около 150 м и перекрыт лавовой пробкой, по периферии которой видны многочисленные фумаролы. Верхняя часть местности — это безжизненная вулканическая пустыня, сформированная разновозрастными лавами и отложениями пирокластических потоков. Значительную площадь занимают снежники, часть из которых многолетние. В нижней части почвенный покров также отсутствует, но в составе растительности появляются растения-пионеры.



Четырехметровый разрез с вулканическими слоистыми почвами.

Местность вулканических построек древнего вулкана Матуа наиболее разнообразна по морфологической структуре. Литогенную основу образуют крутые склоны кальдеры древнего вулкана, отложения лавовых и пирокластических потоков более молодых извержений, фрагменты разновозрастных вулканических плато. В верхней части местности, приближенной к вулканическим пустыням, немалую площадь занимают заросли мертвого ольхового стланика, погибшего во время извержения 2009 г. Однако на большей части местности преобладают густые заросли ольховника, сочетающиеся с участками горных тундр и луговыми полянами.

Местность морских террас локализована в юго-восточной части острова и состоит из серии террас нескольких уровней — низких (от 2–3 до 20 м), средних (до 30 м) и высоких (до 60–70 м). Низкие морские террасы представлены только на юге острова, где они сильно изменены цунами. Особенно страдает от них бухта Айну, где в почвенных разрезах повсеместно встречаются прослой цунамигенных осадков. Последнее крупное цунами случилось здесь после Симуширского землетрясения 2006 г. Высота волн в центральной



Вулканические пустыни, занимающие почти половину площади острова.



Вулканические постройки древнего вулкана Матуа (на среднем плане).

части бухты тогда составила около 20 м, дальность проникновения — примерно 400 м [10]. Цунами полностью разрушило береговой вал на протяжении 70 м и перекрыло почти всю поверхность морских террас в бухте Айну выбросами крупного плавника.

Особенности морфологической структуры островного ландшафта заметно отражаются на природопользовании и антропогенной нарушенности территории. Сильнее всего изменены субгоризонтальные поверхности прибрежных морских террас. Их значительная часть занята фортификационными сооружениями, остатками строений японского и советского периодов. Выше, на склонах кальдеры древнего вулкана и вулканических плато, японские окопы и объекты подземной военной инфраструктуры встречаются лишь на отдельных участках. В местности вулканических пустынь следы деятельности человека практически отсутствуют.



Выбросы плавника и японские окопы на поверхности морских террас в бухте Айну.

Вулканизм и островной ландшафт

Влияние активного действующего вулкана распространяется на весь остров (табл.). Сильнее всего островную природу меняют лавовые и пирокластические потоки, затрагивающие морфолитогенную основу ландшафта. Современные эксплозивные извержения сопровождаются выбросами большого количества пирокластического материала, обломков лавы и горных пород, слагающих стенки кратера, в то время как излияния лав имеют

ограниченный характер. Лавовые и пирокластические потоки, а также вулканические сели (лахары) приводят к полным сменам ПТК, после которых на новой морфолитогенной основе начинаются первичные сукцессии — появляются растения-пионеры, затем образуется относительно сомкнутый растительный покров, формируются почвы. Далее, при вторичных сукцессиях, изменяется только один компонент — растительность [6]. Вторичные сукцессии связаны с пирокластическими волнами, выпадением тефры во время извержений или эмиссиями вулканических газов, которые могут происходить не только при извержении, а в любое время, но, как правило, на ограниченной площади. В целом интенсивность вулканического воздействия максимальна в северной половине острова и уменьшается к юго-востоку.

Таблица

Влияние вулкана Пик Сарычева на природу острова Матуа

Вулканические проявления	Влияние на ландшафт
Лавовые потоки	Полное уничтожение предшествующих ПТК, изменение морфолитогенной основы; восстановительные сукцессии растягиваются на сотни и тысячи лет
Пирокластические потоки	Площадное и линейное уничтожение предшествующих ПТК, изменение площади острова, береговой линии
Лажары	Полное уничтожение долинных ПТК (в долинах, область питания которых находится в зоне пирокластических отложений); восстановительные сукцессии занимают десятки лет
Пирокластические волны	Площадное уничтожение преимущественно стланиковой растительности за счет термического и механического воздействия
Выпадение тефры	Площадное повреждение или уничтожение растительности; формирование вулканических слоистых почв
Газовые эмиссии	Локальное уничтожение или повреждение растительности; изменение химических свойств почв за счет эмиссии вулканических газов

Развитие островного ландшафта во времени носит пульсирующий характер и определяется частотой и силой вулканических извержений. Крупные катастрофы приводят к изменению площади острова и кардинальной трансформации ландшафтной структуры. Лавовые и пирокластические потоки во время извержений могут спускаться от кратера вулкана непосредственно в море. Так, после извержения 2009 г. площадь о. Матуа увеличилась на 1.1 км², т.е. более чем на 2% [11].

Пирокластические потоки значительно меняют характер береговой линии. Длина самого крупного потока, вторгшегося в море после извержения 2009 г., составила около 400 м. В береговой зоне образовалось более десятка пляжей из рыхлых пирокластических отложений. Однако выступающие в море языки сразу же начинают подвергаться абразии. Сравнительный анализ разновременных космических снимков и полевые измерения 2016 г. с помощью GPS-навигатора показали, что ширина вновь образованных пляжей из пирокластических отложений за четыре последних года уменьшилась в среднем на 60 м. Скорость абразии составила примерно 15 м/год.

Изменение ландшафтной структуры после извержений наиболее отчетливо проявляется в значительном увеличении площади вулканических

пустынь [12]. Пирокластические потоки перекрывают островные склоны и полностью уничтожают почвенно-растительный покров. Площадь вулканических пустынь после извержения 2009 г. увеличилась с 15 до 26 км², сейчас они занимают примерно половину острова [13]. Кроме того, снижается высота пояса ольхового стланика. Это главный зонально-островной тип растительности, верхняя граница его сплошного распространения до извержения 2009 г. поднималась примерно до 500 м над ур.м., но к 2016 г. опустилась до 400 м. Выше теперь встречаются лишь многочисленные мертвые стволы. Вместе с тем в мае—июне 2016 г. на свежих пирокластических отложениях отмечены многочисленные проростки ольхового стланика высотой 3–5 см и с длиной корня 7–8 см. Таким образом, ольховник выступает как один из главных пионеров заселения свежих пирокластических полей.

Другая важная составляющая изменения ландшафтной структуры связана с вулканическими селями (лахарами). Они полностью уничтожают ПТК в долинах, по которым сходят. Кроме того, большие площади занимают конусы выноса древних и современных вулканических селей. Сливаясь друг с другом, они местами перекрывают высокие морские террасы.



Мертвые стволы ольхового стланика в зоне схода пирокластических потоков.

После извержения и катастрофической смены ПТК начинается процесс их восстановления к равновесному состоянию. В геосистемах работают механизмы упругости, пластичности и инерционности, обеспечивающие их относительную устойчивость [14]. В 2016 г., спустя семь лет после извержения, на лавовых и пирокластических потоках появились первые семь видов сосудистых растений: остролодочник притупленный (*Oxytropis retusa*), пятилистник кустарниковый (*Pentaphylloides fruticosa*), полынь уналашкинская (*Artemisia unalaskensis*), овсяница красная (*Festuca rubra*), вейник (*Calamagrostis* sp.), колосняк мягкий (*Leymus mollis*) и ольховник (*Duschekia fruticosa*). В большинстве случаев встречаются единичные экземпляры растений, отстоящие друг от друга на несколько метров, но на некоторых участках суммарное проективное покрытие видов-пионеров достигает 5–10%.

Конусы выноса и днища долин лахаров заселяются значительно быстрее. Пролuviaльные отложения самого крупного лахара через семь лет после извержения уже заняты проростками ольховника на большей части площади. Таким образом, если время формирования относительно сомкнутых сообществ на лавовых и пирокластических потоках составляет сотни, возможно — первые тысячи лет, то на конусах выноса и в днищах лахаровых долин растительный покров образуется за десятки лет. Для формирования развитых почв необходимо более продолжительное время, однако высокая активность Пика Сарычева и большое количество тefры, выбрасываемой при извержениях, препятствуют этому. Относительно зрелые зональные сухоторфяно-подбуры обнаружены только на острове-сателлите Топорковом, удаленном от действующего вулкана. На Матуа же абсолютно преобладают слабо развитые вулканические слоистые почвы.

Беллигеративные комплексы

В соответствии с Санкт-Петербургским трактатом от 25 апреля (7 мая) 1875 г. о. Матуа перешел во владение Японии. В 1930-х годах на острове началось строительство японских военных объектов. Была создана крупная военно-воздушная база, где дислоцировался гарнизон, временами насчитывавший 7.5 тыс. человек. Во внутренней части острова функционировал аэродром с ангарами для самолетов и тяжелой техники, работали командные пункты. Система обороны острова была организована путем выделения нескольких ключевых укрепленных районов в местах возможной высадки десанта, связанных между собой и внутри себя наземной и подземной инфраструктурой. Ключевые укрепления включали густую сеть траншей и ходов сообщения, противотанковых рвов, дотов (иногда двухэтажных), бетонных бункеров, блиндажей, капониров, соединенных между собой как на поверх-



Первые растения на шлаковых полях. Они появляются уже через несколько лет после извержения.

ности, так и под землей. Сеть наземных траншей и ходов сообщения в некоторых случаях «проецировалась» под землю. Некоторые подземные ходы и складские помещения повторяют в плане рисунок наземных траншей и окопов и соединяются с поверхностью вертикальными шахтами.

Военная инфраструктура тесно связана с ландшафтно-геоморфологической структурой острова. Большая часть военных объектов локализована в равнинной местности морских террас, где густота ходов, траншей (глубиной до 1.5 м) и противотанковых рвов (до 5 м) превышает 20 км/км². Мощная толща рыхлых пирокластических отложений, перекрывающих морские террасы, позволяла вести здесь обширные земляные работы. Напротив, склоны кальдеры древнего вулкана Матуа с близким залеганием твердых вулканических лав отличаются высокой плотностью объектов подземной военной инфраструктуры. Входы в них были взорваны японскими военными в августе 1945 г. перед капитуляцией гарнизона или завалены в последующем и остаются практически неизученными до настоящего времени. В береговой зоне находится больше всего дотов, укрытий для береговой артиллерии, пунктов технического и визуального наблюдения. На господствующих высотах располагались огневые позиции, в долинообразных понижениях с широкими днищами — склады. Отдельные объекты военной инфраструктуры встречаются в береговой зоне по всему периметру острова в самых неожиданных местах.

Весьма актуальной была проблема водоснабжения многотысячного японского гарнизона. При большой годовой сумме осадков на острове всего один постоянный ручей — Хесупо, расход воды в котором в июне 2016 г. составлял около 1 л/с. Все остальные водотоки имеют сезонный



Один из бетонных бассейнов, сооруженных японцами в днищах долин для сбора талых снеговых вод.

характер. Вместе с тем зимой на острове устанавливается мощный снежный покров, часть снежников сохраняется до конца лета, поэтому система водоснабжения была накопительной. Для сбора талых снеговых вод в днищах долин сооружались бетонные бассейны, часть из которых функционирует и сегодня.

В 1943–1945 гг. Матуа подвергался бомбардировкам со стороны американской авиации и боевых кораблей, однако наземная операция здесь не проводилась. Вследствие этого много наземных и подземных объектов военной и сопутствующей инфраструктуры сохранилось до настоящего времени. Они формируют своеобразный ландшафт, состоящий из густой сети фортификационных сооружений, противотанковых рвов, траншей, дотов, бункеров, капониров, воронок и др., занимающих около четверти островной площади.

* * *

В среднем один раз в 25 лет на Матуа происходят извержения вулкана. Природные комплексы острова и их границы претерпевают изменения, глубина которых зависит от мощности извержения. Сочетание двух факторов — активной вулканической деятельности и хорошо сохранившейся густой военной надземной и подземной инфраструктуры на относительно небольшой площади острова привело к формированию здесь так называемого бelligеративно-вулканического ландшафта. На сегодняшний день его аналоги нигде не описаны, поэтому для нашей страны этот ландшафт по праву может считаться уникальным. ■

Литература

1. Клитин А.К. Курильский дневник // Вестник Сахалинского музея. 2007. №14. С.342–369.
2. Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П.Лавров. М., 2005.
3. Арсланов Х.А., Мелекесцев И.В., Разжигаетова Н.Г. и др. Возраст почвенно-пирокластического чехла и хронология вулканической деятельности на о.Матуа (Центральные Курилы) в голоцене // Квартер во всем многообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г.Апатиты, 12–17 сентября 2011 г.). Т.1. Апатиты; СПб., 2011. С.44–46.
4. Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Разжигаетова Н.Г. Исторические извержения вулкана Пик Сарычева (о.Матуа, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. №1. Вып.7. С.102–119.
5. Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Мелекесцев И.В., Разжигаетова Н.Г. Эксплозивные извержения вулкана Пик Сарычева в голоцене (о.Матуа, Центральные Курилы): геохимия тефры // Тихоокеанская геология. 2012. Т.31. №6. С.16–26.
6. Гришин С.Ю. Сильное извержение вулкана Пик Сарычева // Природа. 2013. №6. С.54–66.
7. Справочник по климату СССР. Вып.34. Сахалинская область. Ч.П. Л., 1970.
8. Атлас Курильских островов. М., 2009.
9. Гришин С.Ю., Терехина Н.В. Растительный покров острова Матуа (Курильские острова) // Комаровские чтения. 2012. Вып.ЛIX. С.188–229.
10. Левин Б.В., Кайстренко В.М., Рыбин А.В. и др. Проявления цунами 15.11.2006 г. на Центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков // Доклады Академии наук. 2008. Т.419. №1. С.118–122.
11. Ганзей К.С., Разжигаетова Н.Г., Рыбин А.В. Изменение ландшафтной структуры острова Матуа во второй половине XX — начале XXI в. (Курильский архипелаг) // География и природные ресурсы. 2010. №3. С.87–93.
12. Ганзей К.С. Развитие островных геосистем под воздействием вулканизма // Вопросы географии. Сб.138: Горизонты ландшафтоведения. М., 2014. С.295–309.
13. Левин Б.В., Разжигаетова Н.Г., Ганзей К.С. и др. Изменение ландшафтной структуры острова Матуа после извержения вулкана Пик Сарычева 12–15 июня 2009 г. // Доклады Академии наук. 2010. Т.431. №5. С.692–695.
14. Дьяконов К.Н., Иванов А.Н. Устойчивость и инерционность геосистемы // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 1991. №1. С.28–35.

Биогенное управление образованием льда

Е.О.Пучков

В условиях земной атмосферы только вода, причем исключительно в жидком состоянии, способна обеспечивать существование уникальной формы материи — живой материи. Однако на Земле есть обширные области, где температурный режим допускает постоянный или периодический переход воды в твердое состояние — в лед, который может повреждать живые клетки. Тем не менее там обитают различные виды животных и существуют многие растения, а также микроорганизмы.

У теплокровных животных проблема защиты от образования льда решена более или менее универсальным способом. Нужная температура тела у них поддерживается за счет тепла, которое выделяется при активном метаболизме и сохраняется различными термоизолирующими покровами (мехом, перьями, подкожным жиром).

Для холоднокровных животных, растений и микроорганизмов природа нашла принципиально другое решение, точнее, даже несколько. В ходе эволюции у них сформировались разнообразные приспособительные механизмы. Их изучает большая и многоплановая область низкотемпературной биологии [1–6], которую трудно (если вообще возможно) осветить в одной журнальной статье. Мы рассмотрим только три уни-



Евгений Октябринович Пучков, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института биохимии и физиологии микроорганизмов имени Г.К.Скрябина РАН. Область научных интересов — фундаментальные и прикладные аспекты анабиоза и гипобиоза, а также разработка и применение методов флуоресцентного зондирования и компьютерного анализа изображений в микробиологии.

Ключевые слова: холодоустойчивость, биогенные коллигативные антифризы, антифризные белки, льдонуклеирующие агенты.

Key words: cold tolerance, biogenic colligative antifreezes, antifreeze proteins, ice-nucleating agents.

кальных молекулярных «инструмента», которые позволяют реализовать две основные стратегии жизни со льдом: исключение замораживания (на англ. *freeze avoidance*) и устойчивость к замораживанию (*freeze tolerance*). Эти «инструменты» — специальные биогенные вещества: коллигативные антифризы, антифризные белки и льдонуклеирующие агенты. Их уникальность заключается в том, что они регулируют (по крайней мере, в определенных пределах) образование льда. Иначе говоря, защита от повреждающего фактора осуществляется за счет влияния на него же. Целесообразно сначала обсудить, как образуется лед и почему он повреждает биологические объекты.

Замораживание воды

При понижении температуры воды может произойти переход из жидкого в одно из двух состояний: аморфное (витрифицированное, стекловидное) или кристаллическое (лед), — в зависимости от скорости охлаждения. Витрификация чистой воды наступает при температуре около -137°C , если скорость отвода тепла составляет не менее $10^7^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Чтобы представить, насколько велика эта скорость теплоотдачи, отметим, что скорость охлаждения образца воды объемом 0.5 мл в тонкой пластиковой пробирке, которую погружают в жидкий азот (-196°C), составляет около $4 \cdot 10^2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Ясно, что в природе витрификация сама по себе не происходит, поэтому

для того, чтобы ее наблюдать и исследовать, нужны специальные экспериментальные методы [7]. При витрификации молекулы вынуждены очень резко замедлить свое движение, и часть из них как бы застывает врасплох: в ходе теплового движения они уже разорвали водородные связи с соседними молекулами, а новых сформировать не успели. Поэтому стекловидное состояние термодинамически неустойчиво. Потенциально, хотя и очень медленно, система должна релаксировать к равновесному состоянию с образованием всех возможных водородных связей и с соответствующим изменением структуры [8]. В стекловидном состоянии вязкость воды достигает 10^{12} Па·с (в жидком состоянии при 20°C вязкость воды равна 10^{-3} Па·с) [8]. Растворение в воде ряда органических веществ способствует витрификации при более низких скоростях охлаждения и более высоких температурах по сравнению с чистой во-

дой, что представляет большой интерес для низкотемпературной консервации биологических объектов [9].

При небольших скоростях охлаждения, которые реализуются в природных условиях, вода может перейти только в кристаллическое состояние — лед — с образованием всех возможных водородных связей между молекулами. Это приводит к упаковке молекул воды в виде шестигранной призмы (рис.1). Однако при разном давлении и в присутствии некоторых других веществ молекулы воды могут упаковываться и по-другому. Так, уже известно около 18 различных кристаллических фаз воды [10].

Температура перехода воды в лед при атмосферном давлении зависит от нескольких условий. Если в чистую воду поместить чистый лед, то при 0°C между ними установится равновесие: соотношение двух фаз будет поддерживаться не-

изменным сколь угодно долго. Незначительное снижение температуры приведет к замораживанию воды. Но это будет температура замораживания воды в присутствии уже существующего льда. При повышении температуры равновесие сдвигается в сторону таяния льда. Поэтому 0°C считают температурой таяния льда. Если же охлаждать только чистую воду без льда, то замораживание наступит при температуре значительно ниже 0°C (от -2°C до -15°C), а прежде вода будет находиться в так называемом переохлажденном состоянии. В этом легко убедиться, проведя опыт даже в домашних условиях. Таким образом, температура замораживания заметно ниже температуры таяния. В специальных экспериментах, когда максимально исключали примеси, а также контакт с любыми поверхностями, переохлажденное состояние сохранялось до температур около -40°C [11].

Объяснение этим закономерностям дает классическая теория нуклеации [12]. Нуклеация — это процесс формирования минимального кристалла, который выступает в роли затравки для последующего роста кристалла (см. рис.1). Теоретически минимальный размер такого кластера в чистой воде без примесей формируется при -41°C — температуре гомогенной нукле-

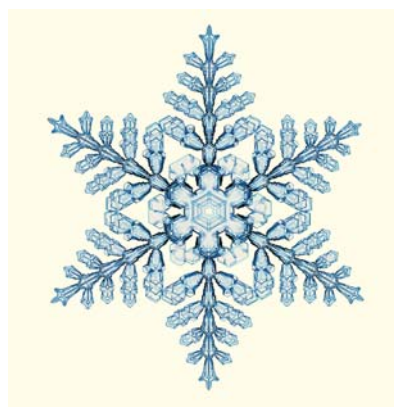
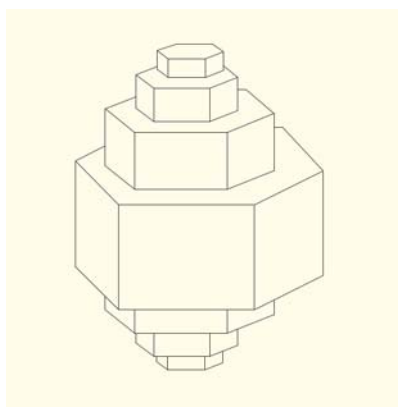
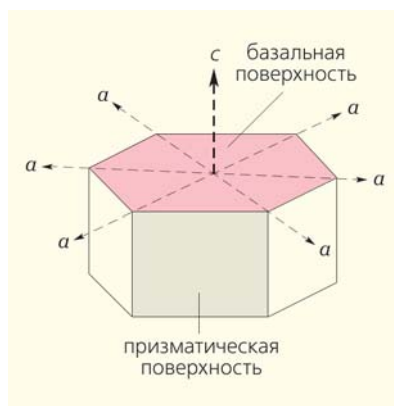
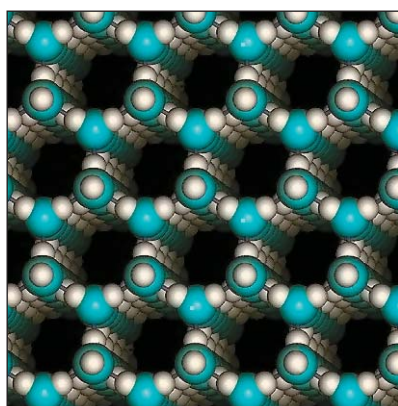


Рис.1. Пространственная структура природного гексагонального льда. Вверху слева — организация молекул воды во льду (голубыми шариками изображены атомы кислорода, белыми — водорода), справа — схема первичного кристалла льда (рост кристалла может происходить как по направлениям осей a за счет присоединения молекул воды к призматическим поверхностям, так и по направлению оси c за счет присоединения молекул воды к базальным поверхностям). Внизу слева — иллюстрация роста кристалла в направлении оси c , справа — фото снежинки, искусственно выращенной профессором физики К.Г.Либбрехтом (K.G.Libbrecht, Калифорнийский технологический институт); хорошо видно, что в основе снежинки лежит первичная гексагональная призма (snowcrystals.com).

ации [13, 14]. Переохлаждение чистой воды до такой температуры действительно можно наблюдать в специальных экспериментальных условиях [11]. Однако в реальных условиях вода замерзает при более высоких температурах, что связано с гетерогенной нуклеацией из-за присутствия чужеродных частиц в самой воде или из-за структурных дефектов сосуда, которые служат матрицей для нуклеации льда [14].

Наличие в воде растворенных веществ приводит к понижению как температуры таяния льда, так и температуры замораживания (нуклеации). Этот эффект определяется только коллигативными свойствами растворенного вещества, т.е. зависит не от его химической природы, а только от концентрации его осмотически активных частиц (осмоляльности) в растворе. На каждый растворенный осмоль на килограмм воды температура замораживания снижается приблизительно на 2°C .

При замораживании воды выделяется скрытая теплота льдообразования. Это энергия, которая высвобождается благодаря переходу в термодинамически более выгодное состояние, когда каждая молекула воды образует с соседними молекулами все четыре возможные водородные связи. Выделение этой энергии приводит к повышению температуры в системе (рис.2) и может обеспечить частичное таяние льда в ходе замораживания. Благодаря этому эффекту при высоких скоростях отвода тепла образуются мелкие кристаллы льда, а при низких — более крупные. Отогрев при медленных скоростях подачи тепла в определенном интервале температур может вызвать укрупнение кристаллов (рекристаллизацию, или оствальдовское созревание) [15].

Криповреждение и крипротекция

Современные представления о том, как замораживание вредит живым организмам, сложились благодаря исследованиям, как повреждающее действие льдообразования на разные типы изолированных клеток зависит от скоростей охлаждения и отогрева. Основные результаты этих исследований суммированы в многочисленных обзорах (например, [16, 17]). Выяснилось, что зависимость выживаемости клеток от скорости замораживания всегда имеет колоколообразный вид, т.е. есть некая оптимальная скорость, индивидуальная для разных

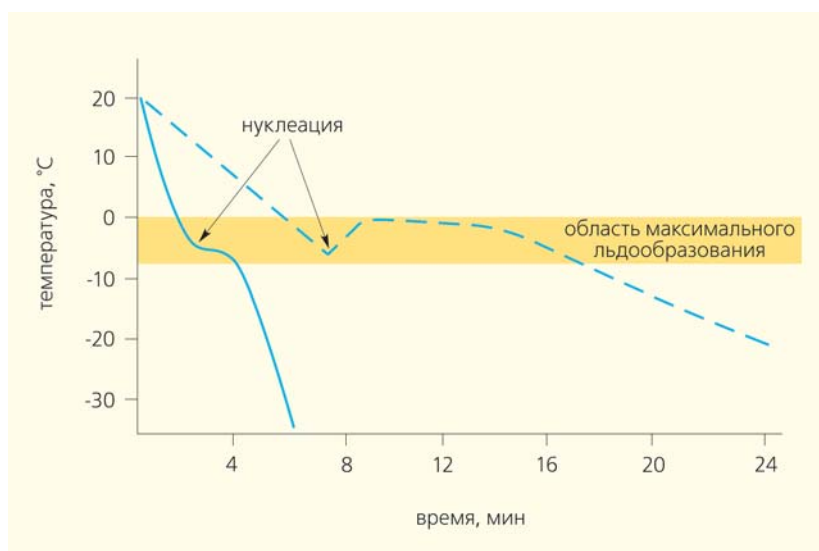


Рис.2. Термограммы быстрого и медленного замораживания водных растворов. Выделение скрытой теплоты льдообразования при быстром замораживании (сплошная линия) проявляется как замедление скорости охлаждения, а при медленном (штриховая линия) — как повышение температуры с частичным таянием льда до равновесного состояния вода—лед при 0°C .

клеток, при которой сохраняется максимальная жизнеспособность (рис.3). При медленном отогреве после быстрого замораживания выживаемость падает. Кроме того, было показано, что вероятность внутриклеточного образования льда зависит от соотношения скоростей охлаждения и выхода воды из клеток.

Так называемая двухфакторная гипотеза объясняет большую часть имеющихся экспериментальных данных. Она предполагает, что выраженность повреждений клеток зависит от соотношения скоростей охлаждения и выхода из клеток воды. При этом на клетки действуют две группы повреждающих факторов, которые про-

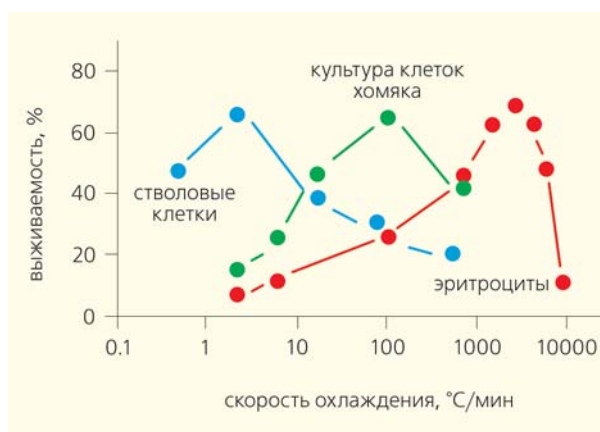


Рис.3. Колоколообразная экспериментальная зависимость выживаемости разных видов клеток от скорости замораживания [17].

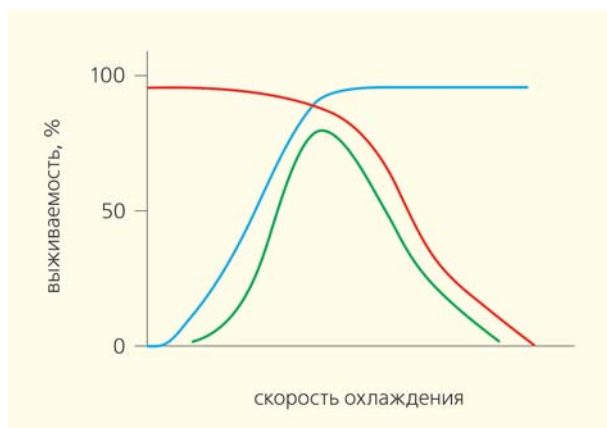


Рис.4. Колоколообразную экспериментальную зависимость выживаемости клеток от скорости охлаждения (зеленая кривая) можно представить как результат суперпозиции двух «зеркальных» процессов повреждения (синяя и красная).

являются по-разному в зависимости от скорости охлаждения (рис.4).

Первая группа факторов более выражена при медленных скоростях охлаждения (рис.5). В этих условиях лед первично образуется во внеклеточной среде, поскольку температура замерзания внутриклеточной воды всегда ниже, чем внеклеточной, из-за более высокой внутриклеточной концентрации различных осмотически активных веществ. При этом вода успевает выйти из клеток по градиенту активности, что проявляется как осмотическое сжатие клеток. Основной повреждающий фактор — обезвоживание клеток с повышением внутриклеточной концентрации неоргани-

ческих ионов (солевой эффект). Это приводит к нарушению структуры и функций макромолекул и надмолекулярных комплексов, в первую очередь мембран. Другим фактором повреждения может быть необратимое изменение структуры мембран при осмотическом сжатии.

Вторая группа факторов проявляется при быстрых скоростях охлаждения (см. рис.5). Вода не успевает выйти из клеток, и внутри них образуется лед, который и вызывает гибель клеток. Сразу после замораживания лед формируется в виде небольших кристаллов, которые затем могут увеличиться за счет рекристаллизации при медленном оттаивании. Этот эффект объясняет дополнительное падение выживаемости клеток при медленных скоростях оттаивания. Предполагается, что лед может механически повреждать ключевые надмолекулярные комплексы: мембраны, рибосомы, нити актина и т.п., — однако строгих доказательств этому нет.

Для разных видов клеток понятия медленной и быстрой скорости охлаждения и оттаивания индивидуальны и имеют конкретные количественные характеристики (см. рис.3). Эта индивидуальность определяется специфичностью коэффициентов проницаемости цитоплазматических мембран для воды у каждого вида клеток, в частности, в разных тканях многоклеточного организма.

Традиционно считается, что впервые способность некоторых низкомолекулярных веществ, названных криопротекторами, защищать живые клетки от повреждающего действия замораживания—оттаивания была показана в 1949 г. [16–18]. Между тем российский ученый Н.А.Максимов (в дальнейшем академик АН СССР) еще в 1912 г. экспериментально продемонстрировал криопротекторный эффект глицерина,

маннитола, глюкозы, этилового и метилового спиртов на эпидермальных клетках листьев красной капусты [19].

Описано множество криопротекторов, которые условно делят на две категории — проникающие внутрь клеток и не проникающие [13, 17]. Защитный эффект проникающих криопротекторов (глицерина, диметилсульфоксида, метанола и др.) носит коллигативный характер, т.е. проявляется при сравнительно высоких концентрациях (>1 М). Протекторное действие коллигативных антифризов отмечается преимущественно при медленных скоростях охлаждения и, вероятнее всего, обуславливается несколькими процессами. Во-первых, они снижают температуру внутриклеточной нуклеации, а также вероятность рекри-

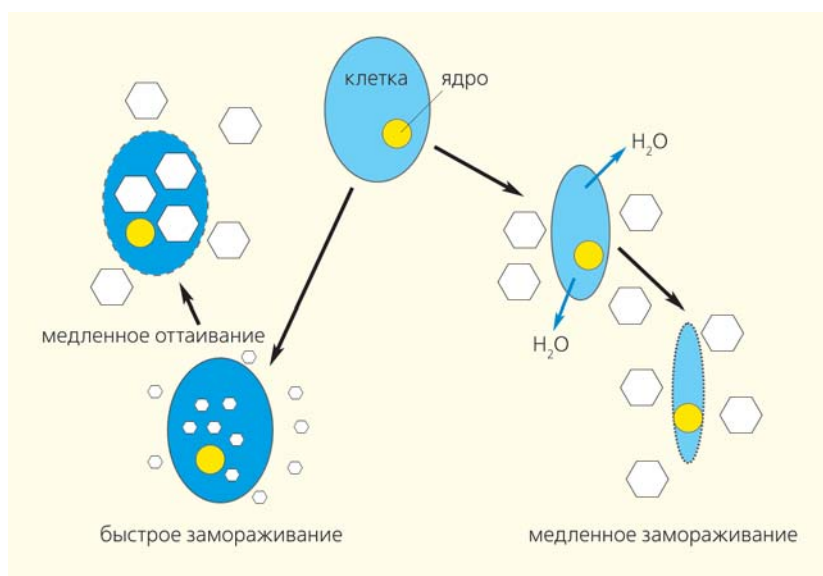


Рис.5. Схематическое представление гипотезы двухфакторного повреждения клеток при замораживании—оттаивании (пояснения в тексте). Кристаллы льда разного размера изображены в виде шестиугольников.

сталлизации. Во-вторых, смягчают осмотический стресс, так как накапливаются в высоких концентрациях и уменьшают градиент осмотического давления при внеклеточном образовании льда. В-третьих, могут непосредственно защищать структуру белков и мембран. Согласно так называемой гипотезе вытеснения, при образовании льда криопротекторы вытесняют из водного окружения белков и мембран концентрирующиеся неорганические ионы (солевой эффект), не вступая в прямое взаимодействие с этими структурами [20]. А согласно гипотезе замещения, некоторые криопротекторы, например пролин и трегалоза, способны замещать молекулы воды, связанные с заряженными «головками» фосфолипидов мембран, и тем самым предотвращать солевой эффект [21].

Предполагается, что непроникающие криопротекторы (различные сахара, поливинилпирролидон, декстран и др.) также уменьшают повреждающее действие солей, которые концентрируются при образовании льда, но снаружи клеток, так как «коллигативно» вытесняют соли из примембранных водных слоев. Они также усиливают действие проникающих криопротекторов.

Биогенные коллигативные антифризы

Максимов еще в начале прошлого века предположил, что высокие концентрации некоторых метаболитов, в частности сахаров, могут защищать клетки растений от образования льда при температурах ниже 0°C [22]. Однако изучение биогенных криопротекторов началось только в 1960-е гг. с исследований особой группы биогенных соединений, так называемых осмопротекторов [23]. Они обнаружены практически у всех видов организмов, от архей до высших растений и животных. Их основная роль — регуляция внутриклеточного осмотического давления при осмотических сдвигах во внеклеточной среде. Они нетоксичны при высоких концентрациях, поскольку не способны напрямую взаимодействовать с макромолекулами. За эту совместимость с метаболизмом их часто называют совместимыми веществами (на англ. *compatible solutes*). Они также обеспечивают защиту от ряда стрессов, в том числе от замораживания, потому что в высоких концентрациях могут выступать в роли биогенных коллигативных антифризов.

Во многих видах растений, адаптированных к замораживанию, накапливаются совместимые вещества, в том числе растворимые сахара, полиолы, бетаин и пролин. Возможно, это свидетельствует о том, что они играют криопротекторную роль,

обеспечивая тем самым устойчивость к замораживанию [4]. На это указывают, в частности, данные о частой корреляции уровня накопленных сахаров и устойчивости к заморозкам. О том же свидетельствуют и результаты генетических исследований. Один из мутантов резуховидки (*Arabidopsis*), утративший устойчивость к замораживанию, не накапливает сахара в ответ на понижение температуры, в отличие от другого мутанта этого растения — конститутивно толерантного к замораживанию, — который делает это даже без индукции понижением температуры. Кроме того, есть мутанты, которые чувствительны к замораживанию, хотя и накапливают сахара при холодовой акклиматизации. Таким образом, накопления сахаров не всегда достаточно для того, чтобы обеспечить устойчивость растения к замораживанию. То же справедливо и для бетаина и пролина [5].

Среди животных, которые накапливают совместимые вещества в качестве коллигативных антифризов, встречаются представители обеих стратегий жизни со льдом — исключения замораживания и устойчивости к образованию льда [5, 6, 23, 24]. К наиболее изученным организмам первой группы относятся гусеницы галлообразующей бабочки *Epiblema scudderiana* и азиатская корюшка (*Osmerus mordax*), в тканях которых накапливаются значительные концентрации глицерина. При этом гусеницы способны оставаться незамороженными до температуры -38°C, а корюшка — плавать при температуре переохлажденной морской воды -2°C.

В тканях организмов второй группы при температурах ниже 0°C происходит внеклеточное образование льда, тогда как цитоплазма клеток не замерзает. В ходе сезонной адаптации к зимнему периоду у таких организмов внутри клеток накапливаются совместимые вещества: глицерин, глюкоза и трегалоза. Представители этой стратегии выживания — личинки золотарниковой пестрокрылки (*Eurosta solidaginis*), накапливающие глицерин, а также эндемичное насекомое Новой Зеландии уэты *Hemideima maori* и лесная лягушка (*Rana sylvatica*), использующие глюкозу и трегалозу соответственно (рис.6).



Рис.6. Лесная лягушка (*Rana sylvatica*) — представитель стратегии выживания в замороженном состоянии. Зимой 35–45% воды в ее теле превращаются в лед, и животное само становится твердым, как кусок льда.

Фото Tom Benson (слева) и Janet Storey

Глицерин, глюкоза и трегалоза, по-видимому, играют осмопротекторную роль при защите от замораживания и у некоторых эндемиков Арктики и Антарктики — насекомых и нематод. По мере замерзания воды в окружающей среде ткани этих животных дегидратируются, что позволяет им избежать образования льда внутри организма. Это происходит благодаря высокой проницаемости внешних покровов для воды, которая выходит из организма в среду, ведь при одной и той же температуре парциальное давление водяных паров у переохлажденной жидкости внутри организма выше, чем у льда снаружи. Такой механизм даже предлагается рассматривать в качестве третьей стратегии жизни со льдом — криопротекции за счет дегидратации [25, 26].

Антифризные белки

История открытия второго биогенного молекулярного «инструмента» для управления образованием льда — антифризных белков — не лишена драматизма. У костистых рыб, обитающих в полярных областях океана, было обнаружено несоответствие между температурой переохлажденной приблизительно до -1.9°C морской воды и осмотической активностью низкомолекулярных компонентов плазмы крови, которая могла обеспечить коллигативное подавление льдообразования до температур не ниже $-0.9\ldots-0.6^{\circ}\text{C}$ [27]. Иными словами, такие рыбы должны были погибнуть от замораживания крови. Безусловно, в плазме крови есть и высокомолекулярные белки, однако они не рассматривались в качестве коллигативных антифризов, поскольку их молярная концентрация слишком мала для того, чтобы подавить образование льда. К счастью, объяснение парадоксальным свойством плазмы крови стали искать именно в связи с белками. Эта работа завершилась выделением из плазмы крови антарктических рыб семейств *Nototheniidae* и *Channichthyidae* гликопротеинов, которые обладали способностью в низких концентрациях подавлять образование льда по какому-то неколлигативному механизму [28]. В дальнейшем оказалось, что кроме этих антифризных гликопротеинов у разных видов рыб, насекомых, растений, грибов и бактерий существует множество антифризных белков. Им посвящены многочисленные обзоры,

поэтому приведем лишь краткие сведения из недавно опубликованных статей [29–33].

Антифризные белки влияют на образование льда двумя способами. Во-первых, они неколлигативно снижают температуру замораживания без существенного изменения температуры плавления льда. А во-вторых, подавляют рекристаллизацию. Согласно гипотезе адсорбционного подавления такое действие антифризных белков объясняется их необратимой адсорбцией на призматических поверхностях зародышевых кристаллов льда (см. рис.1, вверху справа) [35]. При снижении температуры рост кристаллов затормаживается, так как белки препятствуют присоединению дополнительных молекул воды из жидкой фазы. Это сдвигает температуру замораживания в отрицательную область. Аналогично объясняется торможение рекристаллизации.

Количественно активность антифризных белков характеризуют по величине температурного гистерезиса (разнице между температурами таяния и замораживания кристалла льда), а также по концентрации белка, вызывающей изменения в морфологии кристаллов (рис.7) или подавление рекристаллизации (рис.8). Антифризные белки условно делят на умеренно активные с температурным гистерезисом $0.1\text{--}1^{\circ}\text{C}$ и гиперактивные с гистерезисом $2\text{--}6^{\circ}\text{C}$. Типичные значения температурного гистерезиса антифризных белков растений — $0.1\text{--}0.7^{\circ}\text{C}$ (исключение составляют антифризные белки ели европейской, $\sim 2^{\circ}\text{C}$), бактерий — $0.1\text{--}0.3^{\circ}\text{C}$ (исключая антифризные белки *Marino-*

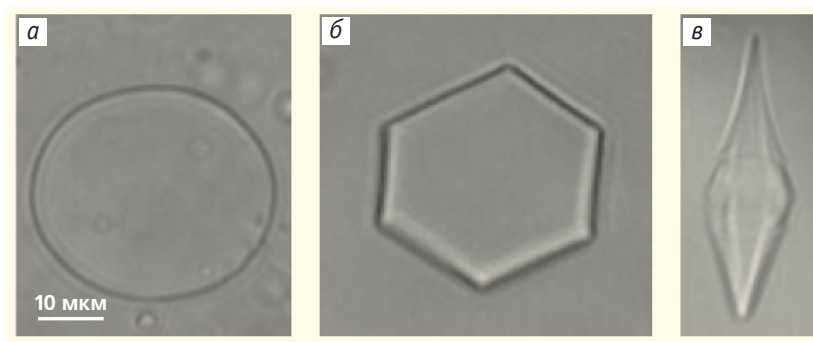


Рис.7. Анализ активности антифризных белков по структуре кристаллов льда [34]. Исследуемый раствор помещают в специальную ячейку наноосмометра, оснащенного микроскопом, и быстро замораживают, охлаждая до температур около $-50\ldots-30^{\circ}\text{C}$. Затем образец медленно нагревают, пока в поле зрения не останется один небольшой, еще не растаявший кристалл льда. После этого температуру вновь медленно снижают, и кристалл начинает расти по всем возможным осям (см. рис.1, вверху справа). В воде или в растворах веществ, не взаимодействующих со льдом, кристалл растет равномерно по всем направлениям и постепенно в сечении принимает вид круглого плоского диска (а). В разбавленных растворах антифризные белки взаимодействуют с призматическими поверхностями кристалла, рост в этом направлении ограничивается, и при виде сверху кристалл, растущий преимущественно вдоль оси с, приобретает гексагональную форму (б). При высоких концентрациях антифризных белков кристалл растет практически только вдоль оси с и при виде сбоку приобретает форму гексагональной бипирамиды (в).

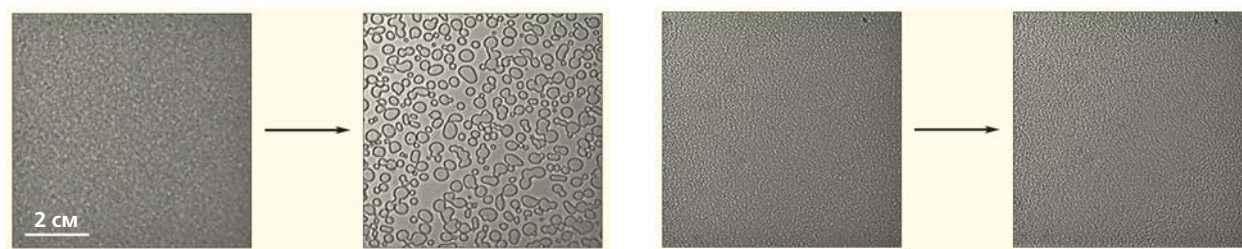


Рис.8. Подавление антифризными белками рекристаллизации льда [31]. Быстрозамороженные образцы буферного раствора без антифризных белков (слева) или с ними выдерживают при -6°C в течение 60 мин. За рекристаллизацией (укрупнением кристаллов) льда следят с помощью криомикроскопа.

monas primoryensis, $\sim 2^{\circ}\text{C}$), рыб (в том числе антифризные гликопротеины) — $0.4\text{--}2^{\circ}\text{C}$, гемолимфы насекомых и пауков — $3\text{--}6^{\circ}\text{C}$. Различия в активности антифризных белков, предположительно, могут быть обусловлены тем, что умеренно активные белки связываются только с призматическими поверхностями зародышевого кристалла, а гиперактивные — как с призматическими, так и с базальными (см. рис.1, вверху справа).

По структуре антифризные белки условно разделяются на четыре типа: I — имеют геометрию прямой β -спирали с молекулярной массой 3–4 кДа; II — глобулярные белки с массой 11.3–24 кДа, содержащие не менее пяти дисульфидных сшивков; III — глобулярные белки со средней массой 6.5 кДа, содержащие β -структуры (рис.9); IV — наименее изученный тип с молекулярной массой 12 кДа. У разных видов у антифризных белков и антифризных гликопротеинов не обнаружено гомологичных последовательностей, что свидетельствует о конвергентной эволюции этих белков. Любопытным оказалось обнаружение у антифризных белков растений гомологичных последовательностей с особыми белками, синтезируемыми при грибковых поражениях. Причем у белков, связанных с грибковым патогенозом, обнаружена антифризная активность.

У всех белков домены, непосредственно взаимодействующие со льдом, различны (рис.10). Роднит их одинаковая относительная гидрофобность. Считается, что преимущественно именно гидрофобное взаимо-

действие обеспечивает адсорбцию за счет возрастания энтропии при высвобождении молекул воды с поверхности льда и белка. Связывание белка со льдом стабилизируется водородными связями и вандерваальсовыми взаимодействиями гидро-

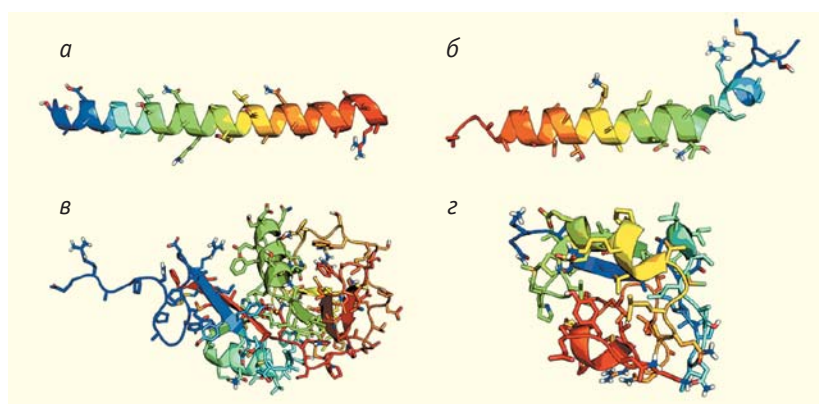


Рис.9. Ленточные модели трех типов антифризных белков, выделенных из разных видов рыб [29]: камбалы зимней (*Pseudopleuronectes americanus*) (тип I; а), морского скорпиона (*Myoxocephalus scorpius*) (тип II; б), представителей семейства волосатиков (Hemitripterae) (тип III; в), представителей семейства бельдюговых (Zoarcidae) (тип IV; з).

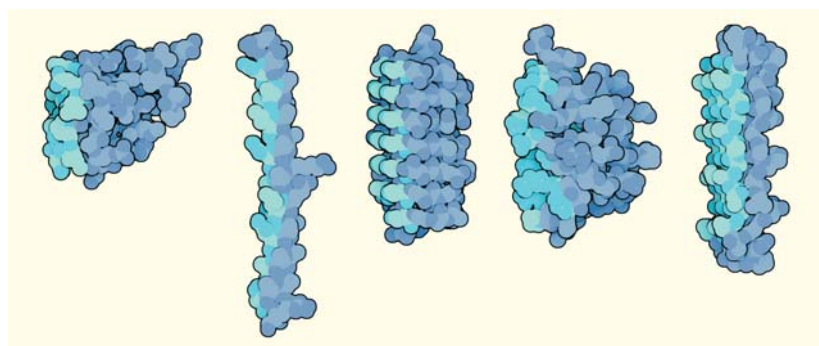


Рис.10. Глобулярные модели пяти антифризных белков, выделенных из разных животных (слева направо): американской бельдюги (*Zoarces americanus*), камбалы зимней (*Pseudopleuronectes americanus*), большого мучного хрущака (*Tenebrio molitor*), еловой листовертки-почкояда (*Choristoneura fumiferana*), ледничника зимнего (*Boreus hyemalis*). Светло-голубым цветом показаны те части белков, которые взаимодействуют со льдом. <http://pdb101.rcsb.org/motm/120>

фильных аминокислот в доменах, взаимодействующих со льдом. Вероятно, некоторая часть молекул воды, связанных в этих доменах, структурно организована так, что может встраиваться в структуру кристалла льда, тем самым обеспечивая (облегчая) адсорбцию белка.

Гиперактивные антифризные белки и антифризные гликопротеины обнаружены у животных, исключаяющих замораживание: у рыб, насекомых и некоторых других наземных членистоногих. Все эти белки предотвращают инокуляцию внешнего льда в цитоплазму при температурах ниже 0°C, а также совместно с биогенными коллигативными антифризами подавляют внутриклеточную нуклеацию. Антифризные белки с умеренной активностью встречаются преимущественно у организмов, толерантных к замораживанию, — у растений, грибов и бактерий. Предполагается, что в этом случае протекторная роль антифризных белков заключается в их способности подавлять внутриклеточную рекристаллизацию.

Кроме антифризных белков существуют еще и антифризные гликолипиды, обладающие способностью с высокой активностью вызывать температурный гистерезис [35]. Они построены из повторяющихся дисахаридных единиц маннозы—ксилозы, связанных с фосфолипидом. Антифризные гликолипиды выявлены как у исключаяющих замораживание, так и у устойчивых к замораживанию насекомых (*Upis ceramoides*, *Dendroides canadensis*, *Cupanoscels clavipes*, *Nemoura arctica*), а также устойчивых к замораживанию лесных лягушек (*Rana sylvatica*) и растения паслена сладкогорького (*Solanum dulcamara*). Антифризные гли-

колипиды, как правило, связаны с клеточными мембранами и у устойчивых к замораживанию видов сдерживают инокуляцию внеклеточного льда в цитоплазму. В гемолимфе таких животных они, по-видимому, подавляют рекристаллизацию. Функции антифризных гликолипидов у исключаяющих замораживание насекомых неизвестны, показано лишь, что они могут увеличивать температурный гистерезис антифризных белков жука *Dendroides canadensis*.

Льдонуклеирующие агенты

Впервые представления о так называемой льдонуклеирующей активности (на англ. *ice nucleating activity*) возникли в метеорологии. В атмосфере были обнаружены микро- и наночастицы, в том числе биогенного происхождения, — льдонуклеирующие агенты, поверхность которых может выступать в роли матриц для нуклеации льда [36]. В 1974 г. с опавших листьев растений были выделены бактерии *Pseudomonas syringae*, обладающие такой активностью [37]. К настоящему времени описано около 17 родов бактерий с подобным свойством [31]. Как правило, они обитают на поверхности растений, а также в виде биопленок в пресноводных водоемах [38]. Наличие льдонуклеирующей активности выявлено также у представителей диатомовых водорослей [39], грибов, растений, насекомых, лишайников [40] и некоторых растворимых макромолекул биогенного происхождения [41].

Проявление льдонуклеирующей активности — повышение температуры замораживания воды. Количественно эту активность характеризуют по спектрам нуклеации [43–46] (рис.11). Бактерии, обладающие таким свойством, могут вызвать образование льда уже при температурах около –2°C, тогда как самый активный неорганический нуклеатор — йодид серебра AgI — вызывает кристаллизацию при температурах ниже –3.5°C.

Молекулярная природа большинства биогенных льдонуклеирующих агентов мало изучена. Главным образом это связано с тем, что их трудно выделить в чистом виде. Лучше других охарактеризованы льдонуклеирующие агенты бактерий, поскольку для них можно применить большой арсенал методов генетики, молекулярной биологии и компьютерного моделирования [31, 47–49]. К настоящему времени исследованы льдонуклеирующие агенты следующих видов бактерий: *Erwinia ananas*, *E.herbicola*, *Pseudomonas fluorescens*, *P.putida*, *P.syringae*, *P.borealis*, *Xanthomonas campestris* [47]. Установлено, что их льдонуклеирующие агенты — белки-нуклеаторы, которые находятся в гликолипидном комплексе внешней мембраны.

По температуре, при которой замерзает 50% капель (показателю T_{50}), белки-нуклеаторы условно делят на три категории: наиболее активные бел-

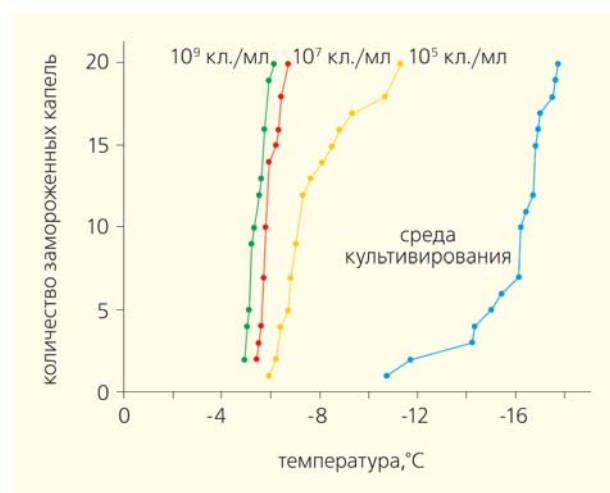


Рис.11. Спектры нуклеации образцов, содержащих бактерии *Shewanella frigidimarina* в разных концентрациях и среду культивирования [42]. На алюминиевые пластинки помещают 20 капель исследуемого образца, затем медленно (со скоростью примерно 1°C/мин) охлаждают от 0 до –20°C и снимают зависимость числа замерзших капель от температуры.

ки с T_{50} от -5 до -1.5°C , умеренно активные с T_{50} от -8 до -5°C и слабоактивные с T_{50} от -10 до -8°C . У исследованных видов молекулярная организация белков-нуклеаторов схожа. Все белки содержат на N-конце гидрофобный домен. Он обеспечивает их заякоривание в мембране, по-видимому, при участии маннозы и фосфатидилинозитола. Между гидрофобным доменом и гидрофильным C-концом расположена большая центральная часть, состоящая из консервативных повторов четырех, восьми и сорока восьми аминокислот. В ней и находится активный центр нуклеации. Как он организован и как функционирует — пока неизвестно. Согласно одной из моделей, димеризация гомологичных участков двух полипептидных цепей создает поверхность, максимально благоприятную для формирования зародышевых кристаллов (рис.12).

Анализ структуры генов и 16S рибосомальной РНК выявил высокую степень гомологии белков-нуклеаторов из разных видов бактерий. Это свидетельствует о дивергентной эволюции признака в результате горизонтального распространения генов и о наличии общего белка-предшественника.

Сравнительно недавно было обнаружено, что некоторые вещества могут частично подавлять активность льдонуклеирующих агентов, т.е. обладают антинуклеирующей активностью [40]. В присутствии таких соединений спектры нуклеации известных нуклеаторов (бактерий, AgJ) сдвигаются в область более отрицательных температур. Антинуклеирующая активность выявлена у антифризных белков насекомых, антифризных белков и гликопротеинов рыб, флавоногликозидов некоторых растений и у ряда других соединений.

Льдонуклеирующие агенты встречаются преимущественно у организмов, устойчивых к замораживанию, и, вероятно, используются ими для защиты от повреждающего действия льда [30, 32, 40, 50]. У бактерий, имеющих белки-нуклеаторы на внешней мембране, образование льда при понижении температуры начинается во внеклеточной среде. Это должно приводить к обезвоживанию клеток и снижению вероятности образования крупных внутриклеточных кристаллов льда. Не исключено также, что выделение скрытой теплоты льдообразования в непосредственной близости от цитоплазмы способствует снижению вероятности внутриклеточной нуклеации до того, как значительная часть воды выйдет из клеток. По-видимому, таким же образом обеспечивается устойчивость к замораживанию у растений и животных за счет индукции внеклеточного образования льда льдонуклеирующими агентами в межклеточной среде. Только в этом случае, как указывалось выше, защитный механизм задействует еще и внутриклеточные антифризные белки с умеренной активностью.

У некоторых исключаяющих замораживание насекомых также обнаружена льдонуклеирующая активность [51]. Она выявлена в кишечнике, что, скорее всего, обусловлено бактериями, у которых

есть белки-нуклеаторы и которые попадают туда вместе с растительной пищей. Кроме того, льдонуклеирующие агенты имеются в гемолимфе. Предполагается, что для предотвращения повреждающего действия льдообразования, индуцируемого льдонуклеирующими агентами, у животных происходит специальная подготовка к зимнему периоду: опорожнение кишечника вместе с бактериями и синтез антифризных белков, обладающих антинуклеирующей активностью.

Следует упомянуть и повреждающий эффект, который вызывают бактерии с белками-нуклеаторами (*Pseudomonas syringae*), обитающие на поверхности неморозостойких растений [50]. Индуцируемые ими кристаллы льда уже при небольшом уменьшении температуры ниже 0°C вызывают разрушение клеток эпидермиса листьев. Вероятно, это явление способствовало эволюционному сохранению белков-нуклеаторов у эпифитных бактерий — благодаря тому, что вещества, выходящие из клеток растения, служили субстратом для бактерий.

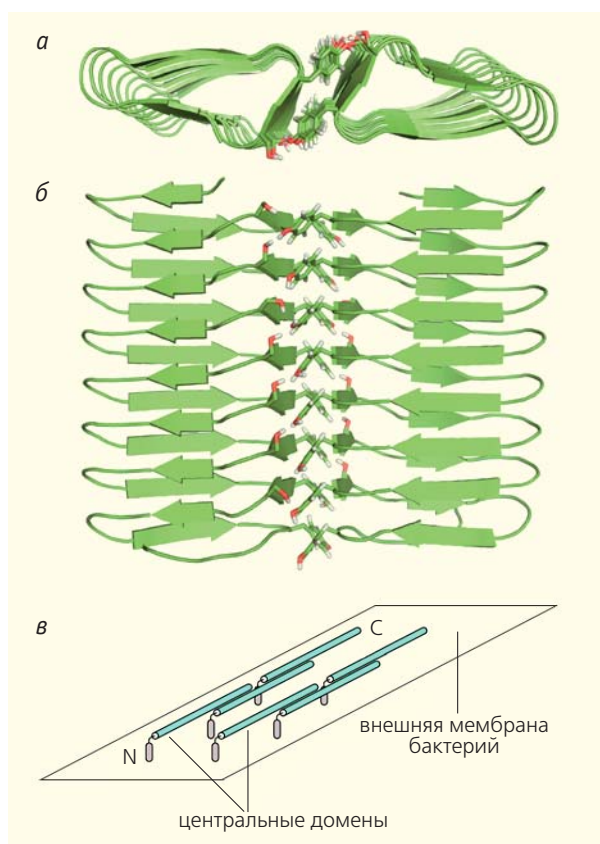


Рис.12. Модель димеризации двух полипептидных β -цепей белка-нуклеатора из бактерии *Pseudomonas borealis* за счет стэкинг-взаимодействия остатков тирозина [49]: поперечное (а) и продольное (б) сечения, а также схема димеризации на поверхности бактериальной клетки (в). Анализ модели показал, что поверхность белка, образующаяся после соединения двух β -цепей, максимально способствует созданию зародышевых кристаллов молекул воды.

Итак, превращение воды в лед — повреждающий фактор для живых клеток. Особую опасность представляет внутриклеточное образование льда. На Земле в областях с температурным режимом, при котором возможно превращение воды в лед, обитает множество разнообразных живых организмов, не способных к терморегуляции. Некоторые из них, например рыбы арктических и антарктических морей, постоянно ведут активный образ жизни. Другие — микроорганизмы, растения и некоторые беспозвоночные животные — в периоды снижения температуры до уровня, вызывающего образование льда, переходят в состояние гипобиоза*. Для сохранения жизнеспособности все они пользуются различными приспособительными механизмами, среди которых особое место занимает

управление льдообразованием. Осуществляется оно с помощью трех биогенных молекулярных «инструментов» — биогенных коллигативных антифризов, антифризных белков и льдонуклеирующих агентов. Первые могут снижать температуру замораживания и стабилизировать внутриклеточное осмотическое давление, а также структуру биополимеров и мембран. Вторые способны подавлять рост зародышевых кристаллов льда и их укрупнение (рекристаллизацию). А третьи способствуют исключению внутриклеточного льдообразования, индуцируя внеклеточную нуклеацию. Применяются эти «инструменты» в различных сочетаниях в зависимости от стратегии выживания со льдом — исключения замораживания (рыбы, некоторые наземные беспозвоночные), устойчивости к частичному замораживанию (растения, насекомые, бактерии), а также криопротекции за счет дегидратации (некоторые насекомые и нематоды).■

* Подробнее о гипобиозе см.: Пучков Е.О. Немножко умереть // Химия и Жизнь. 2015. №1. С.20–28.

Литература

1. Fuller B.J., Lane N., Benson E.E. (eds.) Life in the frozen state. Boca Raton, 2004.
2. Margesin R., Schinner F. (eds.) Cold-adapted organisms. Ecology, physiology, enzymology and molecular biology. Berlin; NY, 1999.
3. Clarke A., Morris G.J., Fonseca F. et al. A low temperature limit for life on Earth // PLoS ONE. 2013. V.8. e66207. Doi:10.1371/journal.pone.0066207.
4. Chen T.H.H., Uemura M., Fujikawa S. (eds.) Cold hardiness in plants: molecular genetics, cell biology and physiology. Wallingford, 2006.
5. Xin Z., Browne J. Cold comfort farm: the acclimation of plants to freezing temperatures // Plant Cell Environ. 2000. V.23. P.893–902. Doi:10.1046/j.1365-3040.2000.00611.x.
6. Doucet D., Walker V.K., Qin W. The bugs that came in from the cold: molecular adaptations to low temperatures in insects // Cell. Mol. Life Sci. 2009. V.66. P.1404–1418. Doi:10.1007/s00018-009-8320-6.
7. Shi M., Ling K., Yong K.W. et al. High-throughput non-contact vitrification of cell-laden droplets based on cell printing // Scientific Reports. 2015. V.5. P.1–10. Doi:10.1038/srep17928.
8. Wouk B. Thermodynamic aspects of vitrification // Cryobiology. 2010. V.60. P.11–22.
9. Fahy G.M., Wouk B. Principles of cryopreservation by vitrification // Day J.G., Stacey G.N. (eds.) Cryopreservation and freeze-drying protocols. Totowa, 2015. V.1257. P.21–82. Doi:10.1007/978-1-4939-2193-5_2.
10. Bartels-Rausch T., Bergeron V., Cartwright J.H.E. et al. Ice structures, patterns, and processes: a view across the icefields // Rev. Mod. Phys. 2012. V.84. P.885–944. Doi:10.1103/RevModPhys.84.885.
11. Biggs E.K. The supercooling of water // Proc. Phys. Soc. 1953. V.B66. P.688–703.
12. Dubrovskii V.G. Nucleation theory and growth of nanostructures. Berlin; Heidelberg, 2014. Doi:10.1007/978-3-642-39660-1_1.
13. Muldrew K., McGann L.E. Cryobiology — a short course. http://people.ucalgary.ca/~kmuldrew/cryo_course/course_outline.html
14. Franks F. Biophysics and biochemistry at low temperatures. London, 2012.
15. Inada T., Modak P.R. Growth control of ice crystals by poly(vinyl alcohol) and antifreeze protein in ice slurries // Chem. Eng. Sci. 2006. V.61. P.3149–3158. Doi:10.1016/j.ces.2005.12.005.
16. Mazur P. Principles of cryobiology // Fuller B.J., Lane N., Benson E.E. (eds.) Life in the frozen state. Boca Raton, 2004. P.366. Doi:10.1201/9780203647073.ch1.
17. Mazur P. Freezing and low temperature storage of living cells // Muhlbock O. (ed.) Proceedings of the workshop on basic aspects of freeze preservation of mouse strains: Jackson Laboratory, Bar Harbor, Maine, September 16th–September 18th, 1974. Stuttgart, 1976. P.1–12.
18. Polge C., Smith A.U., Parkes A.S. Revival of spermatozoa after vitrification and dehydration at low temperatures // Nature. 1949. V.164. P.666.
19. Maximow N.A. Chemische Schutzmittel der Pflanzen gegen Erfrieren. I. // Ber. Deutsch. Bot. Ges. 1912. V.30. S.52–65.
20. Carpenter J.F., Crowe J.H. The mechanism of cryoprotection of proteins by solutes // Cryobiology. 1988. V.25. P.244–255.
21. Rudolph A.S., Crowe J.H. Membrane stabilization during freezing: the role of two natural cryoprotectants, trehalose and proline // Cryobiology. 1985. V.22. P.367–377.

22. Maximow N.A. Chemische Schutzmittel der Pflanzen gegen Erfrieren. III. // Ber. Deutsch. Bot. Ges. 1912. V.30. S.504–516.
23. Yancey P.H. Organic osmolytes as compatible, metabolic and counteracting cytoprotectants in high osmolarity and other stresses // J. Exp. Biol. 2005. V.208. P.2819–2830. Doi:10.1242/jeb.01730.
24. Ramløv H. Aspects of natural cold tolerance in ectothermic animals // Hum. Reprod. 2000. V.15. P.26–46.
25. Holmstrup M., Bayley M., Ramløv H. Supercool or dehydrate? An experimental analysis of overwintering strategies in small permeable arctic invertebrate // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2002. V.99. P.5716–5720. Doi:10.1073/pnas.082580699.
26. Smith T., Wharton D.A., Marshall C.J. Cold tolerance of an Antarctic nematode that survives intracellular freezing: comparisons with other nematode species // J. Comp. Physiol. B. 2008. V.178. P.93–100. Doi:10.1007/s00360-007-0202-3.
27. Scholander P.F., van Dam L., Kanwisher J.W. et al. Supercooling and osmoregulation in arctic fish // J. Cell Comp. Physiol. 1957. V.49. P.5–24.
28. DeVries A.L., Wohlschlag D.E. Freezing resistance in some Antarctic fishes // Science. 1969. V.163. P.1073–1075.
29. Kar R.K., Bhunia A. Biophysical and biochemical aspects of antifreeze proteins: using computational tools to extract atomistic information // Prog. Biophys. Mol. Biol. 2015. V.119. P.194–204. Doi:10.1016/j.pbiomolbio.2015.09.001.
30. Duman J.G. Animal ice-binding (antifreeze) proteins and glycolipids: an overview with emphasis on physiological function // J. Exp. Biol. 2015. V.218. P.1846–1855. Doi:10.1242/jeb.116905.
31. Lorv J.S.H., Rose D.R., Glick B.R. Bacterial ice crystal controlling proteins // Scientifica. 2014. V.2014. P.1–20. Doi:10.1155/2014/976895.
32. Gupta R., Deswal R. Antifreeze proteins enable plants to survive in freezing conditions // J. Biosci. 2014. V.39. P.931–944. Doi:10.1007/s12038-014-9468-2.
33. Бильданова Л.Л., Салина Е.А., Шумный В.К. Основные свойства и особенности эволюции антифризных белков // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2012. Т.16. С.250–270.
34. Griffith M., Yaish M.W.F. Antifreeze proteins in overwintering plants: a tale of two activities // Trends Plant Sci. 2004. V.9. P.399–405. Doi:10.1016/j.tplants.2004.06.007.
35. DeVries A.L. Antifreeze glycopeptides and peptides: interactions with ice and water // Methods Enzymol. 1986. V.127. P.293–303.
36. Vali G. Principles of ice nucleation // Lee R.E., Warren G.J., Gusta L.V. (eds.) Biological ice nucleation and its applications. St. Paul, 1995. P.1–28.
37. Maki L.R., Galyan E.L., Chang-Chein M., Caldwell D.R. Ice nucleation induced by *Pseudomonas syringae* // Appl. Microbiol. 1974. V.28. P.456–460.
38. Hirano S.S., Upper C.D. Ecology of ice nucleation-active bacteria // Lee R.E., Warren G.J., Gusta L.V. (eds.) Biological ice nucleation and its applications. St. Paul, 1995. P.41–61.
39. Knopf D.A., Alpert P., Wang A.B., Aller J.Y. Stimulation of ice nucleation by marine diatoms // Nat. Geosci. 2011. V.4. P.88–90. Doi:10.1038/ngeo1037.
40. Kawabara H. Characterizations of functions of biological materials having controlling-ability against ice crystal growth // Ferreira S.O. (ed.) Advanced topics on crystal growth. Rijeka, 2013. P.119–143. Doi:10.5772/54535.
41. Pummer B.G., Budke C., Augustin-Bauditz S. et al. Ice nucleation by water-soluble macromolecules // Atmos. Chem. Phys. 2015. V.15. P.4077–4091. Doi:10.5194/acp-15-4077.
42. McCorkle A.M. Natural ice-nucleating bacteria increase the freezing tolerance of the intertidal bivalve *Geukensia demissa* // Biology Honors Papers. 2009. <http://digitalcommons.conncoll.edu/biohp/3>
43. Vali G. Quantitative evaluation of experimental results on heterogeneous freezing nucleation of supercooled liquids // J. Atmos. Sci. 1971. V.28. P.402–409.
44. Junge K., Swanson B.D. High-resolution ice nucleation spectra of sea-ice bacteria: implications for cloud formation and life in frozen environments // Biogeosci. 2008. V.5. P.865–873. Doi:10.5194/bg-5-865-2008.
45. Stopelli E., Conen F., Zimmermann L. et al. Freezing nucleation apparatus puts new slant on study of biological ice nucleators in precipitation // Atmos. Meas. Tech. 2014. V.7. P.129–134. Doi:10.5194/amt-7-129-2014.
46. Hartmann S., Augustin S., Clauss T. et al. Immersion freezing of ice nucleation active protein complexes // Atmos. Chem. Phys. 2013. V.13. P.5751–5766. Doi:10.5194/acp-13-5751-2013.
47. Warren G., Wolber P. Molecular aspects of microbial ice nucleation // Mol. Microbiol. 1991. V.5. P.239–243.
48. Graether S.P., Jia Z. Modeling *Pseudomonas syringae* ice-nucleation protein as a β -helical protein // Biophys. J. 2001. V.80. P.1169–1173. Doi:10.1016/S0006-3495(01)76093-6.
49. Garnham C.P., Campbell R.L., Walker V.K., Davies P.L. Novel dimeric β -helical model of an ice nucleation protein with bridged active sites // BMC Struct. Biol. 2011. V.11. P.36. Doi:10.1186/1472-6807-11-36.
50. Zachariassen K.E., Kristiansen E. Ice nucleation and antinucleation in nature // Cryobiology. 2000. V.41. P.257–279. Doi:10.1006/cryo.2000.2289.
51. Duman J.G. Antifreeze and ice nucleator proteins in terrestrial arthropods // Annu. Rev. Physiol. 2000. V.63. P.327–357. Doi:10.1146/annurev.physiol.63.1.327.

Аргонавты: испытание на пути в Понт

*...Устье Понта называется Фракийским Боспором...
Началом этого устья... служит со стороны Понта
так называемое Святое, в котором, как говорят,
Язон... впервые принес жертву двенадцати богам...*

Полибий (II в. до н.э.)

А.А.Никонов

События, о которых пойдет речь, в описательной естественнонаучной литературе отсутствуют, однако в культурной среде рассматриваемый сюжет общеизвестен. Для эпохи раздельного существования и развития гуманитарных и естественных наук это явление обычное. Но период взаимного интереса и даже взаимодействия гуманитариев и природоведов наступил и уже принес немало новостей и сюрпризов.

В истории Древней Греции, как она отражена в трудах классических авторов, немало сведений о реальных сильных землетрясениях и цунами. Часть таких событий оценена как достоверные и, соответственно, внесена в современные каталоги: сейсмический [1] и каталог цунами [2]. Можно не сомневаться, что и в архаичные времена (до VI–V в. до н.э.) подобные события в Средиземноморье возникали. Но тогда они могли отражаться исключительно в виде мифов и эпоса. Специалисты-естественники, как правило, сведения таких источников не используют.

Здесь сделана попытка осмыслить два эпизода мифа об аргонавтах, в той его части, где водное возмущение сначала встретило героев в Пропонтиде (Мраморном море), а затем в проливе Босфор, на выходе корабля «Арго» в Понт (Черное море).



Андрей Алексеевич Никонов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН. Область научных интересов — сейсмостектоника, палеосейсмичность, природные опасности. Постоянный автор «Природы».

Ключевые слова: пролив Босфор, путешествие аргонавтов, землетрясение, грабен-провал, цунами, сейсмостектоника.

Key words: Bosphorus, Argonaut's voyage, graben structure, earthquake, tsunami, seismotectonics.

К истокам памяти о походе аргонавтов

В Древней Греции поэты нередко обращались к сюжету об аргонавтах. О них упоминали Эвмел Коринфский (VIII в. до н.э.), Павсаний (V в. до н.э.), а Геродор из Гераклеи (V в. до н.э.) написал целую поэму, причем использовал древние к тому времени эпические стихи. Около 3 тыс. лет назад Гомер «довел» Ясона до берегов Меотиды (Азовского моря) — предела известного тогда мира у берегов всеобъемлющего *Океана*, откуда восходит солнце. Поэт поэтов сообщил нечто о буйстве природы на краю Ойкумены, чего у позднейших авторов мы не находим. Его рассказ для «запева» в нашем сюжете очень даже подходит.

Вот стих из «Одиссеи», толкуемый как посещение аргонавтами Меотиды с ее «огнедышащими» сопками (горелыми горами): «Здесь... морские волны и бушующее пламя *вместе* уносят доски судов и трупы мужей. Только один проплыл тут мореходный корабль, всем известный «Арго», на возвратном пути»*.

Если верить сообщению, можно дать событию толкование в свете современных знаний. «Бушующее губительное пламя» в Меотиде и на подходе к ней по воде невозможно соотнести ни с чем иным, как только с извержениями грязевых вулканов, теперь здесь хорошо известных и широко распространенных вдоль северного бере-

га Таманского п-ова. Особо значимо при этом поведение моря, «вместе с пламенем» несущее гибель. Что же это за волны, которые способны унести доски и трупы мужей? Это мощные цунами-подобные возмущения вокруг жерл извергающихся подводных грязевых вулканов. В реальности таких водных возмущений можно убедиться на примере извержения 1799 г., когда высота волн достигала 4 м [3].

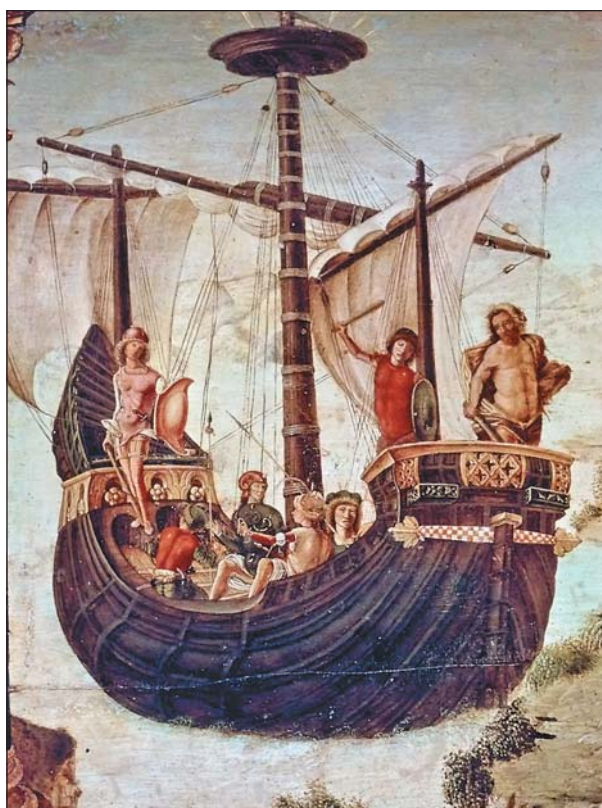
Не верится, что издавна населявшие берега Малой Азии и Мраморного моря племена фракийцев, мисиян, жителей Кизика и Вифинии еще до греков не были знакомы с Босфором. Есть косвенные (по топонимике и археологии) сведения, что финикийцы — торговцы и мореплаватели — знали о проходе в Черное море, которое они называли Ашкеназом (морем Севера) [4]. На месте будущей Византии (Константинополя) находили циклопические строения IX в. до н.э., остатки поселения фракийцев. А на азиатском берегу Босфора (напротив Византии) располагался форпост финикийцев. Греки из Мегары, двигавшиеся в середине VII в. до н.э. на восток, застали там уже город Халкидон. Греческие первопроходцы могли узнать о Босфоре у местных фракийцев.

О Симплегадах и походе в Колхиду были осведомлены «отец истории» Геродот (V в. до н.э.) и «отец географии» Страбон (I в. до н.э. — I в. н.э.). Если в Греции в начале 1-го тысячелетия до н.э. знали о Колхиде, где Гефест приковал к скале Прометея, знали о Геллеспонте (проливе Дарданеллы), где утонула Гелла, то и о Босфоре должны были быть наслышаны. Аполлоний Родосский в III в. до н.э. имел представление о конкретных деталях следования аргонавтов в Босфоре. И потому логично предположить, что сказание имелось уже в записи, ибо в устной передаче за 500 лет такие подробности стерлись бы.

Аргонавтам предстояло совершить воистину «космическое» для своего времени путешествие — к краю мира. «Арго» строили очень прочным, в расчете на долгое и опасное плавание.

*Им Афина Паллада корабль создала, не похожий
На корабли, что себе созидают смертные колхи...
Этот гвоздями держится крепко, хоть все
на него бы обрушились бури,
Он и по ветру бежит, бежит, и когда мореходы
Гонят упорно его, налегая руками на весла*.*

Еще в древности писали, что по меркам своего времени «Арго» был хорошо оснащен. По бортам имелись отверстия для 50 уключин, т.е. гребцы размещались 25 рядами. Всего же (как допускают исследователи) на корабле шли в поход 60–67 человек. Длина судна должна была быть не менее 60–70 м. Как минимум на корабле были установлены одна мачта и парус. «С ветром попутным



Корабль аргонавтов. Художник Лоренцо Коста (1460–1536).



Обзорная карта района пролива Босфор. Прямоугольником выделен рассматриваемый участок.

* Аполлоний Родосский. Аргонавтика // Александрийская поэзия / М.Е.Грабарь (авт.-сост.). М., 1972. Песнь III. 340–346.

в Босфор вошли они водоворотный». Но уже в Пропонтиде аргонатов застала неожиданность.

*В пору же ту из гудящего моря вдруг показался
Главк... в космах густых и до бедер грудь выставя
Вверх над равниной морской, могучей рукой
за днище он ухватился лады...
Молвил он так и, нырнув, погрузился
в немолчные волны.
Завертью вокруг закружилась вода
и пеной покрылась,
Темною стала и полый корабль понесла через море*.*

Не всегда удастся прочитать столь выпуклое, с подробностями описание цунами, скажем, в Черном море в XX в.

Плывя по Пропонтиде, аргонаты немало чего совершили. В том числе спасли от кровожадных гарпий слепого старца-прорицателя Финея. Бывший царь Фракии о проделках Главка предупредить не сумел. Но он заранее сообщил аргонатам об опасностях прохода по коварному проливу сквозь Симплегады:

*Если к Понту она [голубка] между скал
невредимо промчится,
Мешкать вам долго не след, скорей
пускайтесь в дорогу,
Крепче весла в руках сожмите и рассекайте
Моря узкий пролив, ибо свет спасенья не столько
Будет в молитвах для вас, сколько в мощности
рук заключаться.
Вот почему, забыв обо всем, смелей напяржьте
Силы свои... уйдете
Вы от сходящихся скал и проникнете
в Понт без ущерба**.*

На деле проход аргонатов по Босфору оказался куда как страшнее и драматичнее.

Аргонаты в Босфоре

Эпизод называется «Симплегады». В переводах «Симплегадские скалы» даются как сходящиеся, сталкивающиеся или сдвигающиеся. Если говорить о природной реальности, то принять второе значение невозможно, тогда как первое и третье определения вполне приемлемы. Согласно же драматургии эпизода нужно употреблять термин в его крайнем по силе значении. Столкновение скал, такое, что только одно перо пролетевшей меж ними голубки защемилось, — явно поэтический образ, доводящий сюжет до апогея, который необходим в героическом жанре, в ситуации действительно ужасной.

Пролив Босфор Фракийский соединяет Черное море с Мраморным. Его длина около 30 км, ширина — от 3,7 км до 750 м. Берега здесь во многих ме-

стах крутые, скалистые. Три тысячи лет назад (при уровне моря на 3,5–4 м ниже современного) они были еще выше. Геродот соотносил Симплегадские скалы с определенным местом на азиатском берегу Босфора. Но локализовать его трудно. Обращение к крупномасштабной, с батиметрией, топографической карте позволяет лучше понять ситуацию, в которой оказались аргонаты. Босфор отчетливо подразделяется на два участка: южный и северный. Южный (в плане зигзагообразный), длиной примерно 17 км, состоит из секций северо-восточного, меридионального и северо-западного простираения. Северный, длиной около 13 км, прямолинейно идет к северо-северо-востоку, вплоть до Черного моря. Землетрясение, скорее всего, застало героев на участке северном, иначе они просто не смогли бы выйти в Черное море, как бы усердно ни налегали на весла.

Канонический текст и комментарий к нему. «Быстро несся “Арго” по волнам моря. Вдруг послышался впереди отдаленный шум. Все яснее и громче этот шум. Он *похож на рев приближающейся бури*, временами заглушаемой как бы *раскатами грома*. Вот показались Симплегадские скалы. Герои видели, как они расходились и снова со страшным грохотом ударялись друг о друга. *Море вокруг них хлопотало, брызги высоко взлетали...* Когда же вновь расходились скалы, то волны меж ними *неслись и кружились в неистовом водовороте...* Налегли на весла аргонаты. Вот они уже у самых скал. С громом столкнулись скалы и опять расходятся. Вот снова столкнулись скалы с таким громом, что, казалось, дрогнуло небо, соленые брызги обдали аргонатов, а “Арго” *закружился среди волн, словно подхваченный вихрем...* Аргонаты дружно налегли на весла. Разошлись скалы. *Громадная волна с пенистым гребнем* подхватила “Арго” и *бросила его в пролив. Навстречу несет другая волна*, она оттолкнула назад “Арго”... Вот *поднялась еще волна, высокая, подобная горе*. Она обрушилась на “Арго”, и *закружился он, как утлый челн...* Явилась на помощь аргонатам сама любимая дочь Зевса — Афина Паллада. Могучей рукой удержала она одну из скал, а другой с такой силой *толкнула “Арго”, что он стрелой вынесся из пролива...* снова сошлись скалы и остановились навеки недвижимо, по сторонам пролива... Долго плыли аргонаты вдоль Эвксинского Понта»***.

Оставляя за скобками чисто мифические сопровождения и дополнения, специалист найдет в коротком рассказе целый букет явлений и признаков (отмечены курсивом), характерных для мощных землетрясений и цунами. Нельзя отнестись к реальным сведениям о столкновении скалистых берегов пролива, ибо ширина его от одного до нескольких километров. Но вот колебания скальных бортов, так же как отрывы и выбросы отдельных

* Аполлоний Родосский. Аргонатика. Песнь I. С.1310–1330.

** Там же. Песнь II. 330–346.

*** Кун Н.А. Легенды и мифы Древней Греции. Аргонаты. М., 1954. С.224–225.

блоков в воды пролива, — явления вполне реальные при землетрясении $\geq IX$ баллов.

Более того, перемещения скальных выступов и выбросы их в пролив с разных берегов в противоположных направлениях попросту невозможны без мощного сейсмического воздействия. Выделим и другие, косвенные признаки: *как бы раскаты грома*, заглушающие шум приближающейся бури, *со страшным грохотом удаляющиеся друг о друга скалы*.

Повторение сходных событий в коротком сюжете не выглядит художественным приемом, нагнетающим ужас. Это, скорее, отражение повторяемости явлений. Такое обычно и происходит при сильных землетрясениях с афтершоками. В данном случае в пользу такого толкования говорит и сообщение о столь сильном столкновении (или раскалывании) скал, что показалось, будто дрогнуло небо. Подобные впечатления при мощных землетрясениях отмечались и в позднейшей истории. Наконец, богиня (а кто еще на это был способен?) удержала (в конце главной серии толчков!) *одну из скал*. Иными словами, скала пошатнулась, сдвинулась, но не свалилась в пролив. Это ли не прямой признак сильного толчка? По макросейсмической шкале сила должна быть не менее VIII баллов. А гром такой, будто *дрогнуло небо*? Одним словом, на основании приведенных описаний можно говорить, что аргонавты стали свидетелями мощного землетрясения (и моретрясения).

Беснование моря и испытания ставшего вдруг утлым красавца «Арго» становятся более понятными, если рассматривать их поэтапно, по мере движения со стороны Мраморного моря (Пропонтиды) в море Черное (Понт).

Начало. «Арго» быстро неся, и вдруг послышался (а еще ничего не было видно впереди) шум, все *яснее* и громче, *похожий на рев приближающейся бури*. Но бури-то не было, о воздухе и небе — ни слова. *Ревела* вода. Так ревет вал цунами, особенно когда гребень волны обрушивается вперед.

В горниле. Впереди показались скалы. Берега движутся, колеблются (поперек пролива), грохот, море клокочет, высоко поднимаются брызги. Скалы продолжают *расходиться* и сталкиваться (рефрен 4–5 раз!). Волны в проливе *несутся* и кружатся в водовороте — это мощная *толчая* волн в стесненном пространстве без односторонне направленного перемещения. «Арго» закружило водоворотом, словно его захватил вихрь (но не воздушный). Громадная движущаяся волна с пенящимся гребнем *бросает* корабль (вдоль пролива), затем противоположно несущаяся волна отбрасывает его обратно — действия, типичные для цунами. Еще одна волна (третья), высотой *подобная горе*, обрушивается на судно, и оно начинает кружиться, *как утлый челн*. В общем, как минимум два-три типа возмущения водной стихии описывают цунамиподобные явления: бурление, толчая, водовороты (моретрясение) и крупные одно- и встречно на-

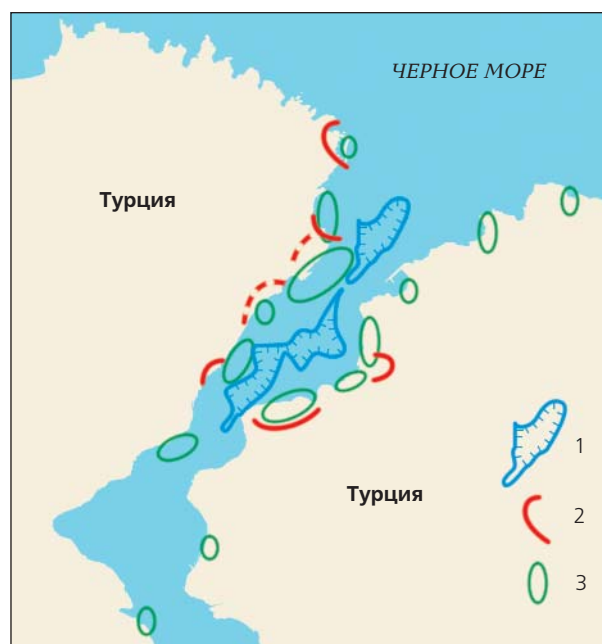


Схема особенностей и нарушений разного рода на северном участке пролива Босфор. 1 — продольные впадины глубиной более 60 м на дне пролива, интерпретируемые как грабены-провалы; 2 — участки крупных срывов скальных пород и оползней; 3 — обвальные и оползневые тела вблизи береговой линии.

правленные одиночные волны с обрушивающимися гребнями, которые носят корабль в разные стороны (вдоль пролива, ибо о скалы его не бросает). Волна, как *гора*: не менее 2–3 м.

Исход. Одновременно односторонний мощный толчок в одну из скал (землетрясение) и удар очередной волны (цунами?) такой силы и направленности, что корабль стрелой (направленно) выносится из пролива в море. И волна там, естественно, должна расходиться веерообразно и по открытому морю, и на ближайшие берега Фракии (к северу) и Вифинии (к востоку).

Проверка сведений по поэме Аполлония Родосского «Аргонавты». У этого автора обнаруживается и хорошее знакомство с общей географией региона, и знание конкретных особенностей топографии именно пролива. Из поэмы мы узнаём ряд важных, вполне правдоподобных деталей. Но, может быть, это некие поэтические вольности? Такой вопрос снимается, если знать принципы александрийской поэзии и биографию автора. Начнем с того, что Аполлоний — уроженец Египта, ученый, воспитатель будущего царя Птолемея. Ученый-поэт в Античности — явление обычное. В данном случае особое значение имеет то, что Аполлоний длительное время был директором Александрийской библиотеки, т.е. имел доступ к богатейшему собранию древних манускриптов, до нашего времени не дошедших (об этом свидетельствует вставка, сохранившаяся

в другом собрании). Второе важное обстоятельство заключается в указаниях поэтам того времени при обработке сказаний и легенд давать законченное повествование с тщательным описанием подробностей и безукоризненной отделкой стиха. Специалисты по истории и искусству Древней Греции склоняются к тому, что рассказ об аргонавтах создан на основе не дошедшей до нас поэмы о первых плаваниях греков в Понт.

Еще в извилистой (южной) части пролива «в уши меж тем уже бил им скал сшибавшихся грохот, и отвечал ему гулом волной омываемый берег». Главные события начались позже.

Минувая излучки пролива,
 Видят они, как в последний миг расступились скалы.
 Дух захватило у всех.
 <...>
 [Скалы] ...опять, не помедлив, друг другу навстречу
 Вдруг устремились, сошлись, загремели, и, бурно волнуясь,
 Море воздвиглось, как туча, и гул пробежал по пучине
 Страшный, и вокруг весь эфир преисполнился шума;
 Недра полых пещер у подножья скал ноздреватых
 Звук издали глухой под прибоем моря, на брег же
 Белой пены клочья с кипящей волны ниспадали.
 Сразу теченьем корабль завертело. ...Скалы
 Вновь расступились. ...Снова
 Их корабль понесло на волне, побежавшей обратно
 Прямо меж скал... над их головой неизбывная гибель нависла.
 Понт широкий уже там и сям проглядывать начал,
 Но неожиданно тут волна большая воздвиглась
 Прямо пред ними, нависнув подобно крутому утесу.
 <...> ...И под киль вся волна излилася,
 Вверх с кормовой стороны корабль подняв и отбросив
 Вдаль от скал, и на гребне ее он долго носился.
 ...на сколько двигали весла
 Судно вперед, на столько же вспять его относило
 Дважды...
 <...>
 Вору огромная вновь на корабль волна налетела,
 И, наподобье катка, покатился он неудержимо
 Жадной влеком волной к глубокому морю. Но между
 Скалами водоворот задержал его.
 Скалы гудели... а он стоял неподвижен...
 Тут от крепкой скалы корабль отторгла Афина
 Левой рукой, а правой вперед его протолкнула.
 Он же, схож с окрыленной стрелой, приподнявшись, помчался.
 <...>
 Что же до скал, то они, сойдясь почти что вплотную,
 Сразу же укоренились*.

Только ознакомившись с текстом Аполлония, начинаешь понимать, почему на этом месте Ясон впервые принес жертву 12 (!) богам.

Заметим (ибо это значимо для последующего рассмотрения), что все главное происходит в то время, когда с корабля уже проглядывал выход из пролива в море, т.е. на северном, прямом отрезке. Важно также, что сообщается только о воде и скалах, о ветре и здесь — ни звука.

Попытаемся раскрыть смысл некоторых «деталей». Еще в южной части пролива путешественников настиг грохот *сшибавшихся* (или сваливавшихся с берегов) скал. И гул. Маловероятно, чтобы он шел от волн, которые омывали берег. Скорее всего, гул был подземным, какой обычно возникает в эпицентральных зонах сильных землетрясений. Заметим, волны здесь, на юге, уже появились. Но они только «омывали» берег, т.е. были небольшими, в отличие от тех, что разыгрались на севере пролива. Там скалы (с противоположных берегов) устремились навстречу друг другу, загремели (трескались, соударялись).

Мощные противотечения в проливе при набегах волн на разные берега естественно порождают мощные водовороты, легко вовлекающие в круговерт и корабли. Обратное движение волн так же обычно при цунами, как и перенос на их гребнях судов на далекое расстояние. В данном случае особенно важно сообщение о том, что волны к концу эпизода *побежали меж скал*, т.е. вдоль пролива к выходу в Черное море, и волна понесла корабль как на катке.

Уже перед выходом в море задержанный водоворотом у крепкой скалы «Арго» вдруг от нее оторвался, будучи предварительно приподнят. Приподнять его могла только очередная, пришедшая с юга (где и разворачивался главный катаклизм) волна. Но приподняла она именно корму, а затем понеслась вместе с кораблем *стрелой* по прямому, открытому к северу отрезку пролива. Скалы позади корабля сошлись, не столкнувшись, и застыли на месте, *почти что вплотную*.

И вот что примечательно: все явления происходили сначала с нарастающей, а затем убывающей силой. Как это бывает над очагом мощного землетрясения. Естественное для возникновения водоворота место на прямолинейном северном участке пролива — залив у западного берега, перед мысом Гарипче, на выходе к Черному морю. Самое же узкое место пролива в пределах северного участка находится примерно в 3 км к юго-западу. Вот там-то скалы, вероятно, шатались и валялись. Там, кстати, рельеф береговых склонов хранит явные следы нарушений, а в воде у восточного побережья выделяются обширные навалы глыб и скальных обломков. В этом отношении весьма выразительна группа крупных скальных оползней с высокого крутого левобережья, напротив правобережного выступа суши с мысом Кавак. Да и на самом правобережном выступе, се-

* Аполлоний Родосский. Аргонавты // Александрийская поэзия. М., 1972. Песнь II. 553–605.

вернее мыса, сохранился крупный массив склоновых нарушений со смещениями к северу. Здесь вдоль берега распознаются и признаки молодого левостороннего сдвига. Это как раз одно из двух самых узких мест пролива, всего 0.8–0.9 км. И именно на данном участке по обоим берегам склоны поднимаются до 120–180 м, а у их подножий вдоль берегов протягиваются скопления глыб и скальных обломков (чего нет южнее). Между мысами Гарипча и Пойраз располагается основание «раструба» пролива, открывающегося к Черному морю. На том же западном берегу склоновые нарушения с сейсмическими признаками выделяются и на крайнем севере, между выступом в Черное море и мостовым переходом у населенного пункта Гарипча. Ныне у самого северного края пролива, т.е. у выхода в Черное море, расстояние между крайними мысами противоположных берегов составляет 3.5 км.

Где же, как не на этом участке Босфора, искать эпицентральному зонку застигнувшего аргонатов катаклизма?

Осторожные оценки

В тексте поэмы Аполлония Родосского о землетрясении прямо не сказано. Да, находясь на воде, аргонаты сотрясений земли на себе ощутить и не могли, как не могли выделить моретрясение на фоне отчаянно бушующей воды. Но по нескольким признакам оно выводится. Обнаружив и обдумав сведения древних о происшествии на Босфоре Фракийском 3 тыс. лет назад, с учетом огромного числа данных по землетрясениям и цунами в последующей истории (включая и катастрофы в Средиземноморье), что остается предпринять специалисту? Попытаться оценить, разумеется, осторожно, в первом приближении, параметры событий. В Черноморье сведения о цунами пока не простирались до начала I тыс. до н.э. А в юго-западном углу Черного моря, у входа в Босфор, цунами мы вообще не знали. Между тем, указания на эпицентральному область вырисовываются довольно определенно. Это северный, прямолинейный участок Босфора длиной 10–15 км. Приведем аргументы в пользу такого решения:

— здесь наиболее отчетливо выражены признаки молодого грабена в скальных породах (см. ниже);

— оцениваемая по макросейсмической шкале интенсивность легендарных сотрясений (на обоих берегах!) фактически предельная, что указывает на непосредственную близость к надочаговой области (или совпадение с ней). Очаговые области сильных землетрясений в ближайших частях акватории Черного моря неизвестны, а очаги разрушительных землетрясений у восточных берегов моря Мраморного (на расстояниях 30–40 км) не могли породить у северо-вос-

точного края Босфора сотрясения с интенсивностью \geq VIII баллов;

— наконец, не только высота, но и характер водных возмущений, как они выводятся по приведенным текстам (особенно их действие в противоположных направлениях вдоль пролива), больше согласуется с позицией источника возмущений непосредственно под этим участком.

На прямолинейном отрезке Босфора волны цунами могли распространяться вдоль оси пролива, тогда как южнее (где пролив в плане уже коленообразный) они обязательно набрасывались бы на берега. Гибель корабля при этом неминуема. Так, по независимым признакам можно наметить, где аргонатов застал катаклизм — на участке длиной примерно 10 км перед выходом в Черное море.

Сложнее дело обстоит с определением интенсивности и магнитуды землетрясения. Для оценки интенсивности используем несколько косвенных признаков. Главным можно признать перемещение (вплоть до обрушения в воду) скал на крутых берегах, возможно, поперек к их протяжению. Согласно шкале INQUA-2004, такие сейсмонарушения развиваются при сотрясениях IX баллов [5]. Грохот, наподобие содрогания неба, вряд ли мог произойти от дробления и падения скал, так же как и гул, тем более неоднократный. Оба явления типичны для сильных (не менее VII–VIII баллов) землетрясений. Да и волны, обрушивающиеся сверху на скалы и поднимающиеся выше корабля (при безветрии!), не связать с мощным землетрясением трудно.

Обнаружен и дополнительный признак. Дистанционные фотоизображения местности в разных ракурсах (ресурсы Google) дают возможность распознать по берегам Босфора в северной его части (особенно в сужениях и на крутосклонных выступах) ряд сбросовых уступов, блоковых скальных обвалов и крупных оползней разного возраста. Блоковый оползень-провал и серпообразные оползни на западном берегу возникли в скальных породах, что дает основание считать их сейсмически обусловленными. Подобные склоновые нарушения, как правило, не возникают при сотрясениях менее VIII–IX баллов [5]. Однако остаются под вопросом их возраст и единовременность возникновения.

Еще один важный показатель — длительность землетрясения. В обычной ситуации корабль мог пройти через пролив примерно часа за полтора. Реально же при выявленных обстоятельствах путь должен был занять больше времени. Насколько можно понять, толчки продолжались все это время. Самых сильных было не менее трех-четырех. Такие признаки, как общая длительность сейсмического возмущения в основной фазе и множество сильных толчков, следующих за главным, присущи событию очень значительному. Если даже один из толчков достигал VIII баллов (а иначе скалы бы не трескались и не валились), то главный

толчок, вполне вероятно, эту величину превышал. Его интенсивность могла составлять IX баллов.

Для определения глубины очага данных не хватает. Но даже только длительность землетрясения склоняет к признанию того, что очаг был не приповерхностным. В таком случае правомочно принять среднее соотношение $I_0 \sim M$. Значению $I_0 = \text{VIII} - \text{IX}$ может соответствовать магнитуда 6–6.5 (по весьма осторожной оценке). За последние 2 тыс. лет из 16 цунами в Мраморном море магнитуды породивших их землетрясений определены в диапазоне 6.5–7.7, причем у половины из них $M > 7$ [2]. Так что ничего невероятного мы не получаем, приняв значение $M = 6.8 \pm 0.8$.

За последнее столетие в Средиземном море при землетрясениях с $M \leq 7.0$ высота волн цунами составляла 2.5–3 м, но были случаи, когда она доходила до 8 и 11 м [2]. Тоже ничего невероятного.

Босфор как тектонический грабен

У специалистов по тектонике нет сомнений в том, что впадина Босфор представляет собой новейший грабен, рассекающий крупный массив консолидированных раннепалеозойских пород. На ее тектоническое происхождение указывают и морфология, и морфометрия: зигзагообразная в плане структура (три резких поворота на дистанции 30 км), крутые скалистые берега, перепады высот более 100 м над ур.м., глубины 27–120 м, да еще 90–100 м четвертичных отложений на дне. В поперечных сечениях перепады высот на расстоянии в несколько километров составляют 130–220 м под ур. м. и 150–230 м выше него, т.е. суммарно 280–450 м.

Но вот новейшая структура прямолинейного северного участка, где произошел катаклизм, нуждается в обосновании. Там морфоструктуры, продольные относительно простираения пролива, выражены вполне отчетливо. Береговые склоны в нижних частях поднимаются на высоту до 100 м, а ближайшие к воде вершины гор достигают 230–250 м. Активное тектоническое обновление (углубление?) дна пролива (после крупной регрессии Черного моря во время последнего материкового оледенения) должно было произойти 7.5 тыс. лет назад, когда возникло соединение Мраморного моря с Черным [6]. Это был внезапный прорыв морских вод по Босфору в замкнутый солоноводный Черноморский бассейн, о чем свидетельствует резкая граница между новоэвксинским и черноморским комплексами отложений в глубоководных колонках Черного моря.

Грабеновую структуру северного, рассматриваемого нами участка Босфора без материалов бурения строго обосновать невозможно. Однако есть доказательства «от противного». Альтернативной может быть гипотеза об эрозионном генезисе линейной впадины, а именно, признание уз-

кой, длинной, ограниченной 50-метровой изобатой впадины результатом врезания в днище мощного потока воды. Но по детальным батиметрическим картам обнаруживается, что в продольном профиле «канал» не имеет одностороннего уклона, а состоит из нескольких впадин с перемычками высотой 20–30 м. Такая морфометрия никакими экзогенными причинами не объясняется. А замыкание 50-метровой изобаты непосредственно у выхода в открытое море, углубление дна здесь до 70 м и наличие на дне поперек выхода из пролива порога высотой 20–35 м убеждает совсем отказаться от эрозионной гипотезы. Признание грабена-провала (причем новейшего и с молодым обновлением), похоже, остается единственным вариантом. Ничто не мешает последнее обновление соотносить с мощным катаклизмом трехтысячелетней давности. Тем более, что подобные (и в связи с мощными землетрясениями) явления в Средиземном море достаточно известны, начиная с античности.

Античные авторы имели представления об изменении положения суши и моря: медленно — веками, внезапно — одновременно. Вот, например, у Страбона: «Наводнения, землетрясения, извержения, поднятия морского дна поднимают также море, а с другой стороны, опускание материка понижает море... Иногда пропасти поглощают целые местности и жилища: Бура, Бизона и многие другие были, по преданию, поглощены вследствие землетрясения»*.

Из этого отрывка следует, что Страбон знал о возникновении «пропасти» (провалов дна) при сильных землетрясениях (в Греции) и «наводнениях» (цунами), с этим связанных. Вряд ли он знал о провале на Боспоре, но о внезапном соединении вод двух бассейнов, вероятно, подозревал.

Ныне именно с активизацией грабена соотносят возникновение пролива 7.5 тыс. лет назад, когда уровень Черного моря, в то время замкнутого, находился примерно на 40 м ниже современного [7].

При настоящем уровне знаний мощное цунамигенное событие древности на юго-западе Черного моря ставиться под сомнение не должно, хотя бы потому, что в соседнем Мраморном море известны мощные цунами с большими площадями затопления и многочисленными жертвами (например, в 447 и 542 гг.). Они внесены в каталоги землетрясений [1] и в каталог цунами Средиземноморья [2]. Сведения о землетрясениях на Босфоре в Средние века и в Новейшее время поступали регулярно. В основном они шли из Византии (Константинополя, Стамбула) — крупного столичного города, стоявшего на перекрестье путей. Особенно разрушительные землетрясения происходили там в VI–XI вв., и они нередко сопровождались цунами в прилежащем Мраморном море [2].

* Страбон. География. М., 1984. Книга 6. Глава 3. §10.

Но землетрясения и цунами в Босфоре в ката-
логах не значатся. Только в последние десятиле-
тия здесь стали регистрироваться умеренные
($M \leq 5$) землетрясения, причем именно в север-
ной части пролива. Однако стоит только отплыть
в соседствующее Мраморное море... и у его вос-
точного берега, в районе Принцевых о-вов, всего
каких-то 120 лет назад (10 июля 1894 г.) раз-
разилось IX-балльное землетрясение вдоль под-
водного разлома, который простирается с запа-
до-северо-запада на востоко-юго-восток [8]. Его
магнитуда оценивается величиной $M = 6.6-6.7$.
У берегов Стамбула, т.е. у южного конца Босфо-
ра, море сначала отступило, а затем мощно на-
бросилось на берега [2]. Осуществленные в том
же году российской экспедицией повторные
промеры дна в эпицентральной области зафик-
сировали увеличение глубин на 70–120 м [8]. Что
это, как не сеймотектонический провал? В Сре-
диземноморье он вовсе не единственный, даже
только за историческое время [9].

Итак...

Никуда не деться, нельзя не сравнить ситуацию
и историю катастроф в Босфоре Фракийском
и Босфоре Киммерийском [10]. Оба они не просто
проливы, а грабены, оба представляют собой
сейсмогенерирующие зоны. Через первый пролив
мосты давно существуют. Через второй — мост
ударно строится. Что дальше?

Итак, «дела давно минувших дней, преданья ста-
рины глубокой». Что же мы узнали нового, значи-
мого? Каково место мифологического события на
фоне наших современных знаний? После катаст-
рофических цунами 2004 г. в Индийском океане
и у берегов Японии в 2011 г. проблему начинает
осознавать все большее число людей, даже неспе-
циалистов. И не только на берегах океанов, но и во
внутренних бассейнах. В России всерьез занялись
Черным морем. Вместо каталога 1997 г. с 22 собы-
тиями ныне подготовлен каталог из 49 событий.
Среди них есть несколько очень серьезных, при-
чем на всех берегах — турецком, болгарском, кав-
казском, крымском. Только вот юго-западный бе-
рег (по обе стороны Босфора) пустовал, хотя близ-
лежащее Мраморное море, напротив, «обеспечено»
сведениями о цунами довольно представительно.
Пора и на юго-западных берегах Черного моря на-
чинать их целенаправленные исследования.

В конце сюжета отдадим особую честь дочери
всемогущего Зевса — Афине Палладе, а заодно
и Аполлонию Родосскому. Богиня спасла аргонав-
тов от неминуемой гибели в пучине зажатого ска-
лами Босфора, вытолкнув их корабль в открытое
море. Воистину ей пришлось всерьез напрячься,
чтобы поднять мощную волну, способную вынести
в гостеприимный Понт против течения (со скоро-
стью 1.5 м/с!) корабль «Арго» с невредимыми геро-
ями. И без поэмы Аполлония мы не узнали бы о по-
дробностях экстремального катаклизма в проливе.

Нет, недаром у Святого устья Понта Ясон при-
нес жертву... 12 богам! ■

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-05-00727а).

Литература

1. *Παναζαχοу Β., Παναζαχοу Κ.* Οι σεισμοί της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη, 1989.
2. *Soloviev S.L., Solovieva O.N., Go C.N. et al.* Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C. — 2000 A.D. Dordrecht, 2001.
3. *Паллас П.С.* Поездка во внутренность Крыма вдоль Керченского полуострова и на остров Тамань (Продолжение) // Зап. Импер. Одесского об-ва истории и древностей. Одесса, 1883. Т.13. С.35–107.
4. *Бацалев В.В.* Тайны городов-призраков. М., 2012.
5. *Michetti A.M., Esposito E., Gürpınar A. et al.* The INQUA scale. An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically induced ground effects in natural environment // Special paper APAT. Memorie descrittive della carta geologica d'Italia. Roma, 2004. V.LXVII.
6. *Degens E.T., Ross D.A.* Chronology of the Black Sea over the last 25 000 years // Chem. geology. 1972. V.10. P.1–16.
7. *Каплин П.А., Селиванов А.О.* Изменения уровня морей России и развитие берегов: прошлое, настоящее, будущее. М., 1999.
8. *Андрусов Н.И.* Экспедиция «Селяника» на Мраморное море // Записки Импер. Русского географического об-ва. 1896. С.15–19.
9. *Никонов А.А.* Сеймотектонические грабены-провалы в Средиземноморских бассейнах как специфический феномен развития новейших внутриконтинентальных впадин // Тектоника современных и древних океанов и их окраин. Матер. XLIX Тектонического совещания. 3–5 февр. 2017 г. М., 2017.
10. *Никонов А.А.* Мощное цунами в проливе... Керченском // Природа. 2016. №5. С.29–38; №7. С.30–40.

Долгосрочный прогноз летнего муссона в Индии

Е.Д.Суровяткина,

доктор физико-математических наук
Институт космических исследований РАН
Москва

Начало и завершение сезона муссонных дождей в центральной части Индии теперь можно прогнозировать, причем значительно раньше, чем это было возможно для муссонов вообще. Новая методология их прогноза, разработанная международной группой исследователей, в которую вошли специалисты Германии, Швейцарии, США и России, недавно представлена в журнале *Geophysical Research Letters* (GRL) [1].

Основной механизм, ответственный за наступление муссонов, — сезонные изменения атмосферной циркуляции и осадков, связанные с асимметричным нагревом суши и моря (суша нагревается сильнее и быстрее, чем море), а также с сезонным глобальным перемещением так называемой внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) — зоны низкого давления вдоль экватора, где встречаются пассаты (тропические ветры) Северного и Южного полушарий, что приводит к образованию максимального количества осадков. Поскольку ВЗК следует за максимумом солнечной радиации, она перемещается вместе с сезонным изменением склонения солнца (в пределах $\pm 23^\circ 27'$). Так, с наступлением лета в Северном полушарии она смещается к северу, принося летний муссон в Индию.

Юго-западный муссон приходит на территорию этой страны в виде двух основных ветвей — из Бенгальского залива и Аравийского моря. Обычно примерно 1 июня он обрушивается на территорию штата Керала на южной оконечности п-ова Индостан, а затем на время уходит в Бенгальский залив, чтобы вернуться уже с востока. При этом страна замирает в ожидании этого события, так как доходы бедных (а это 70% населения, в основном занятого в сельском хозяйстве), продовольственная безопасность и запасы питьевой воды зависят от сезона дождей.

Характерная черта муссона — внезапность его наступления и завершения, причем даты могут ва-

рьируются от года к году в течение месяца. По этой причине прогноз муссона по всей территории Индостана представляет сложнейшую и еще не решенную научную проблему. В настоящее время Департамент метеорологии Индии прогнозирует начало сезона дождей 15 мая только для штата Керала. Его приход и завершение по всей стране констатируют лишь постфактум (т.е. эти события не прогнозируются).

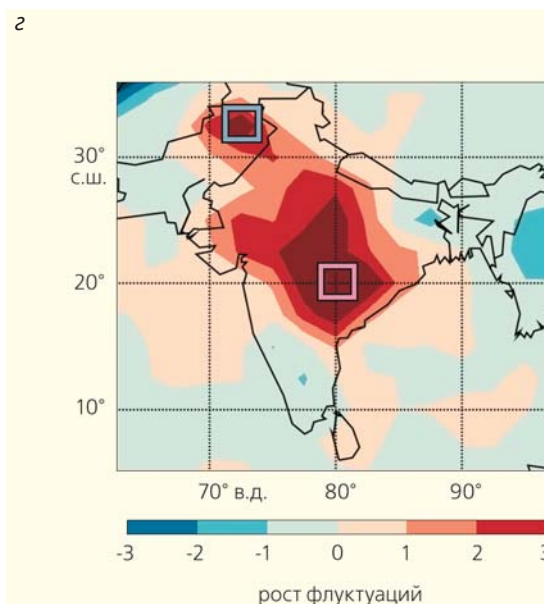
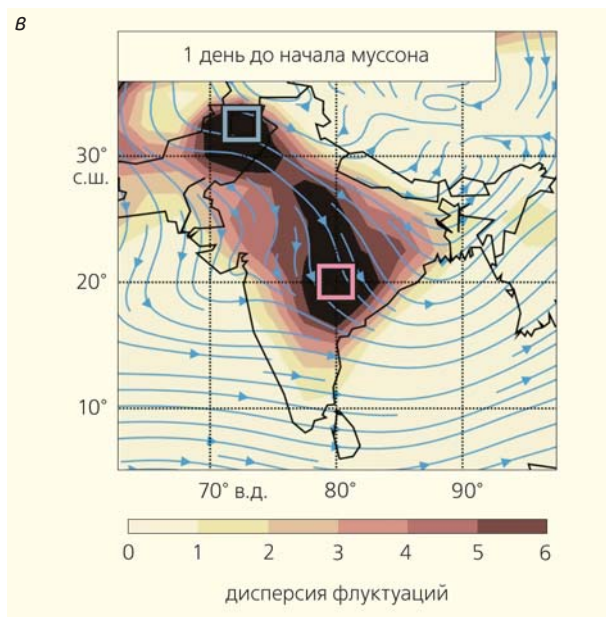
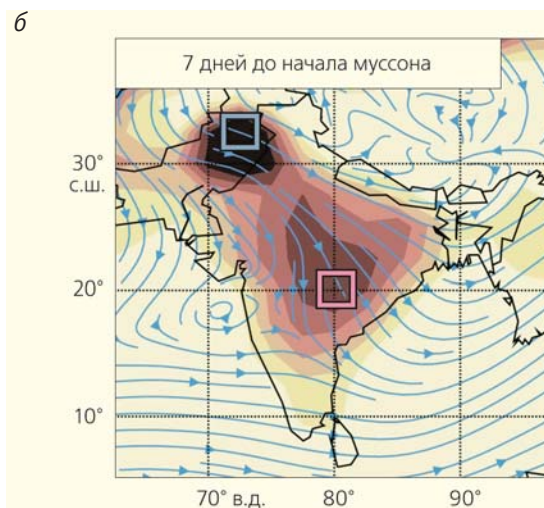
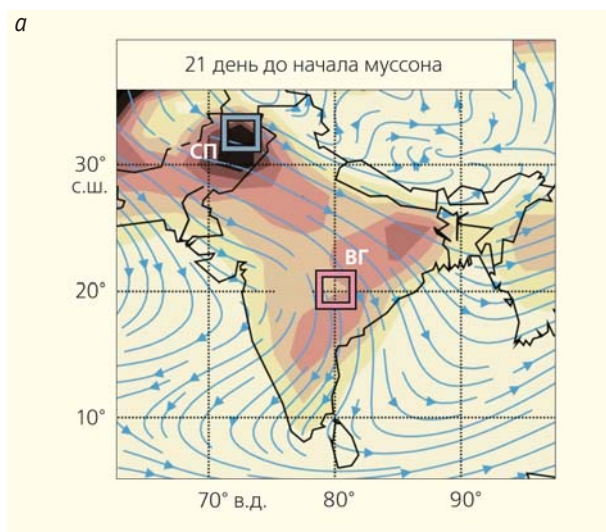
Исследования муссона проводились на основе данных реанализа NCEP/NCAR (Национального центра океанических и атмосферных исследований, США) и ERA-40 (Европейского центра среднесрочных прогнозов) о среднесуточной приповерхностной температуре и относительной влажности воздуха. В работе использовались данные за 1951–2015 гг. с широтно-долготным разрешением $2.5 \times 2.5^\circ$. Ученым удалось выявить в пространственной организации муссона такие регионы, в которых зарождаются критические условия, необходимые для его возникновения, причем это явление происходит существенно раньше начала сезона дождей. Один регион расположен в районе горного хребта Восточные Гаты (точка с координатами 20° с.ш., 80° в.д.), здесь локализуется главный критический элемент образования муссона в Индии, другой — в Северном Пакистане, где муссона как такового не бывает, но именно здесь формируется второй критический элемент, который задает направление его распространения. Оба региона становятся системообразующими элементами муссона в Индии.

Чтобы их обнаружить, авторы предложили новый метод определения места зарождения критических элементов, основанный на явлении предбифуркационного роста флуктуаций приповерхностной температуры накануне критических переходов. Главные положения метода были разработаны в 2004 г. сотрудниками Института космических исследований РАН Ю.А.Кравцовым и Е.Д.Суровяткиной [2]. Говоря упрощенно, перед переходом системы в новое состояние величины некоторых переменных начинают быстро и довольно сильно «раскачиваться», флуктуировать. И если внимательно следить за ходом этих флуктуаций, то можно предсказать надвига-

Ключевые слова: индийский муссон, критические явления, долгосрочный прогноз.

Key words: indian monsoon, critical phenomena, long-term forecast.

© Суровяткина Е.Д., 2017



Идентификация критических элементов муссона. Усиление роста флуктуаций (средние значения) в распределении приповерхностной температуры в районе п-ова Индостан в преддверии муссона по данным ERA-40 за 1971–2002 гг. (а, б, в). Голубыми линиями обозначено распределение направления ветров. Разность флуктуаций между третьей (а) и последней (в) неделей перед муссоном (г). Предмуссонный рост флуктуаций в Восточных Гатах и Северном Пакистане и средние значения флуктуаций по полуострову (д). Видно, что флуктуации в критических элементах увеличиваются перед муссоном, в то время как среднее значение флуктуаций снижается, не показывая предвестников начала муссона.



яущиеся критические события, например переход системы в другое состояние, что важно в технических системах для предотвращения аварий. Однако в природных системах, когда необходимо предсказать конкретное время перехода (в частности, начало муссона), это можно было сделать только по уже имеющимся данным наблюдений. В новом методе предлагается альтернатива — использовать критические флуктуации для обнаружения не времени, а места зарождения критического перехода.

Итак, накануне муссона в центре Индии возникают два кластера (Восточные Гаты и Северный Пакистан), в которых наблюдается усиление флуктуаций приповерхностной температуры. Оно вызвано несколькими причинами. Во-первых, в Восточных Гатах в этот момент солнце находится в зените — данная область широт становится самой горячей точкой на п-ове Индостан. Во-вторых, географическое положение способствует образованию в регионе зоны с пониженным давлением. В-третьих, здесь встречаются два мощных воздушных потока (ветви муссона) из Аравийского моря и Бенгальского залива. В результате в Восточных Гатах формируется сильный циклон, который аккумулирует влагу из двух источников сразу. В Северном Пакистане в этот момент образуется антициклон. Флуктуации приповерхностной температуры возникают раньше и растут сильнее всего в центрах циклона и антициклона. Их столкновение в Восточных Гатах совпадает с тем, что в это же время туда прибывает внутритропическая зона конвергенции, и это приводит к июньским муссонным дождям в регионе, которые продолжаются потом севернее на протяжении четырех месяцев. Фактически авторам исследования впервые удалось объединить в концепции критических элементов две причины возникновения муссона: асимметричный нагрев суши и моря и сезонное перемещение ВЗК.

Второе важное свойство муссона, обнаруженное учеными, — равенство значения температур в Восточных Гатах и Северном Пакистане накануне сезона дождей. После его наступления температура в первой зоне падает, а во второй растет. Момент начала муссона — это критический переход, после которого возврат в премуссон уже невозможен. Эффект усиления флуктуаций исчезает. Подобное явление выравнивания температуры в исследуемых регионах возникает и в преддверии завершения сезона дождей.

Эти свойства муссона специалисты положили в основу нового метода прогноза, согласно которому сравнительный анализ данных внутри критических областей позволяет определять даты наступления и завершения сезона дождей в центральной части Индии. Проверка метода показала положительный результат в 84% случаев за последние 57 лет наблюдений.

Статья в GRL с описанием концепции критических элементов была опубликована в апреле 2016 г., а прогноз начала муссона по новой методологии появился 6 мая, за 40 дней до события. По опубликованным данным, сезон дождей в Восточных Гатах должен был начаться 13 июня 2016 г. (с погрешностью ± 4 дня). Муссон пришел туда 17 июня. 27 июля того же года, за 70 дней до даты прогноза, ученые опубликовали данные о завершении муссона 5 октября (с погрешностью ± 5 дней). Его окончание пришлось на 10–12 октября. Оба события попали в предсказанный диапазон дат. Принимая во внимание, что метеослужбы предсказывают погоду только на 5 дней вперед, долгосрочный прогноз по новой методологии оказался весьма успешным.

Концепция критических элементов не ограничивается приложением к Индийскому муссону, а может быть применена для предсказания внезапных критических переходов в геофизике, технических системах, биофизике и медицине. ■

Литература

1. Stolbova V., Surovyatkina E., Bookbagen B., Kurtbs J. Tipping elements of the Indian monsoon: Prediction of onset and withdrawal // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V.43. P.3982–3990.
2. Surovyatkina E.D., Kravtsov Yu.A., Kurtbs J. Fluctuation growth and saturation in nonlinear oscillator on the threshold of bifurcation of spontaneous symmetry breaking // *Phys. Rev. E.* 2005. V.72. №4. P.046125-1–046125-7.

Почему на Сахалине и Кунашире отсутствуют тропические земляные черви *Drawida*?

Г.Н.Ганин,

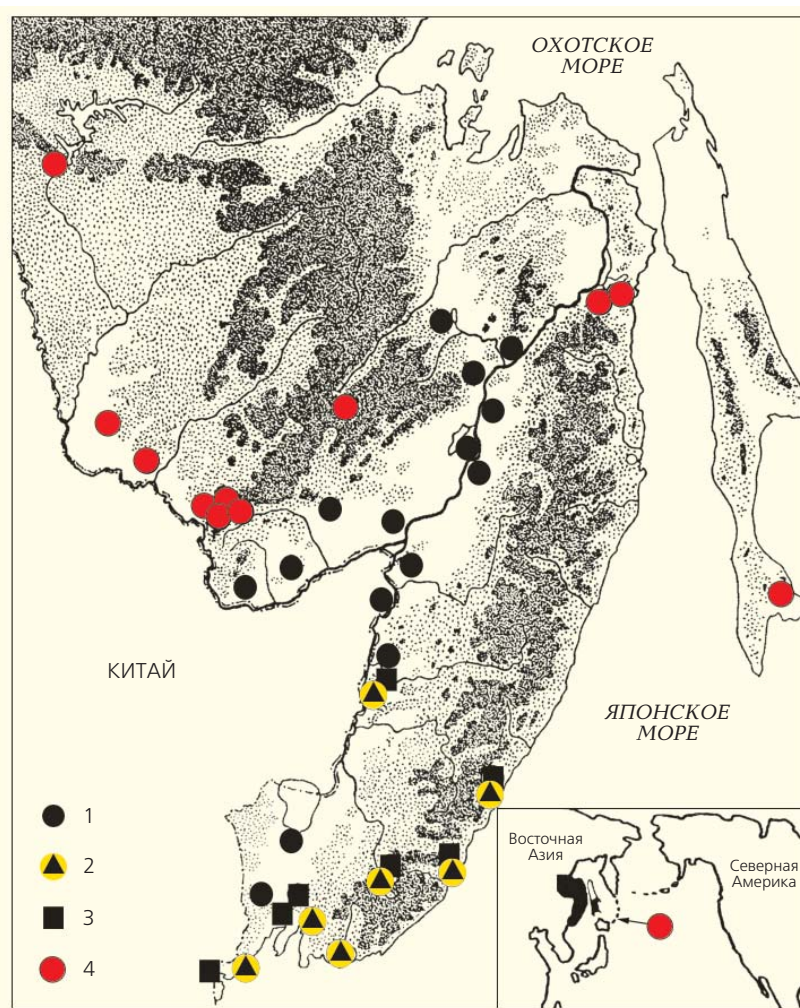
доктор биологических наук

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН
Хабаровск

Известно, что земляные малощетинковые черви (Oligochaeta) тропического семейства монилигастрид (Moniligastridae) вторглись в Юго-Восточную Азию после столкновения индийского и азиатского геологических плато в третичном периоде, т.е. около 70 млн лет назад [1]. Относящийся к этому семейству род *Drawida* назван по имени одного из древнейших темнокожих этносов Южной Индии — дравидов.

«Ареал *Drawida* — от Приморского края СССР, Китая, Кореи, Японии, через Малайзию и Восточную Азию до южной оконечности Индостана (если не до Цейлона) — обширнее, чем у какого-либо иного рода дождевых червей» [2, с.676]. В ходе обзора мировых публикаций по распространению видов рода *Drawida* на территориях, прилегающих к Дальнему Востоку России, было выявлено значительное разнообразие этих монилигастрид. По данным японского исследователя Р.Блакемора [3], в Китае обитает в общей сложности 22 вида дравид, из них в ближайших к России северо-восточных провинциях — 9 видов, на Корейском п-ове — 26, на Японских о-вах — 9 видов. И только юг Дальнего Востока России, где отмечался всего один вид этого рода, выпадает из общего разнообразия [4].

Данный факт, безусловно, объясняется слабой изученнос-



Находки разных морф рода *Drawida* (Moniligastridae) на карте юга Дальнего Востока России: 1 — черные, 2 — коричневатые, 3 — зеленовато-голубые, голубовато-серые, серые, коричнево-голубые, 4 — только дождевые черви семейства Lumbricidae с пурпурной пигментацией.

Ключевые слова: земляные черви, дравиды, монилигастриды, Дальний Восток России.

Key words: earthworms, *Drawida*, Moniligastridae, Russian Far East.

© Ганин Г.Н., 2017



Морфы *Drawida*: а — эпигейная лугово-болотная черная; норники лесные: б — коричневая; в — коричневая и зелено-ватоголубая; г — серая.



Типичные местообитания экологических групп *Drawida*: а — лугово-болотный биотоп, эпигейные черви (Нижний Амур, Вандан); б — лесной биотоп, норники (Приморье, заповедник «Кедровая Падь»).

тью фауны олигохет уссурийской тайги. Дравида Гилярова (*Drawida ghilarovi*) описана как новый для науки вид по его серой цветовой морфе, найденной Т.С.Перель в 60-х годах XX в. в лесных биотопах заповедников «Кедровая Падь» и «Уссурийский» [2]. Считаясь долгое время единственным представителем тропического рода на северном пределе своего распространения, вид занесен в Красную книгу РФ и Хабаровского края. О возможности нахождения в Приморье нескольких видов *Drawida* упоминалось еще в середине 70-х годов Г.Ф.Курчевой [5]. При этом по мере пополнения материала в отечественной литературе (см. обзор: [6]) увеличивалось и количество встреченных вариантов окраски *D.ghilarovi*: светло-голубоватая, зеленовато-голубая, голубовато-серая, смоляно-черная, зеленоватая или голубоватая, иссиня-черная с металлическим отливом, коричневатая или голубовато-серая. В своей последней (2014) сводке по олигохетам этого рода Блакемор отнес *D.ghilarovi* к комплексному виду [3].

По результатам наших исследований на сегодня можно говорить о двух экологических группах *Drawida*: почвенно-подстилочных (эпигейных) и норниках [7]. Эти монилигастриды явно отличаются по фенотипу и типичным местообитаниям. Эпигейные черви — обитатели лугово-болотных пойменных биотопов Приамурья и южного Приморья с лугово-глебовыми или торфяными почвами — имеют черную пигментацию. Норники, живущие в лесных биотопах Приморья и южного Приамурья с подбурными и бурными горно-лесными почвами, полиморфны (коричневатые, зеленовато-голубые, голубовато-серые, серые). Симпатрия* для лугово-болотных и лесных червей не отмечается. Генетические различия между дравидами из этих экологических групп достаточны для их выделения в разные виды [8].

Представляется интересным ретроспективный анализ ареала лугово-болотной эпигейной *Drawida*. В настоящее время черная дравида имеет прерывистый (дизъюнктивный) ареал. Кроме биотопов Среднего и Нижнего Амура этот червь обитает лишь на самом юге Приморья, в пойме рек Раздольная и Илистая, вблизи оз.Ханка. По нашим сборам, основные места встречаемости этого червя совпадают с очертаниями бассейна пра-Амура [9], которые река имела в позднем неогене. Около 12.5 млн лет назад с запада и востока распространение таких дравид ограничивалось (в соответствии со схемой предполагаемой реконструкции речной сети) древними водоразделами — современными хребтами Малого Хингана и Сихотэ-Алиня соответственно. Одна из гипотез о древнем

* Симпатрия (от греч. *συν* — вместе и *πατρίς* — родина) — способ видообразования, при котором возникновение новых видов происходит в популяциях с перекрывающимися либо совпадающими ареалами. — Примеч. ред.

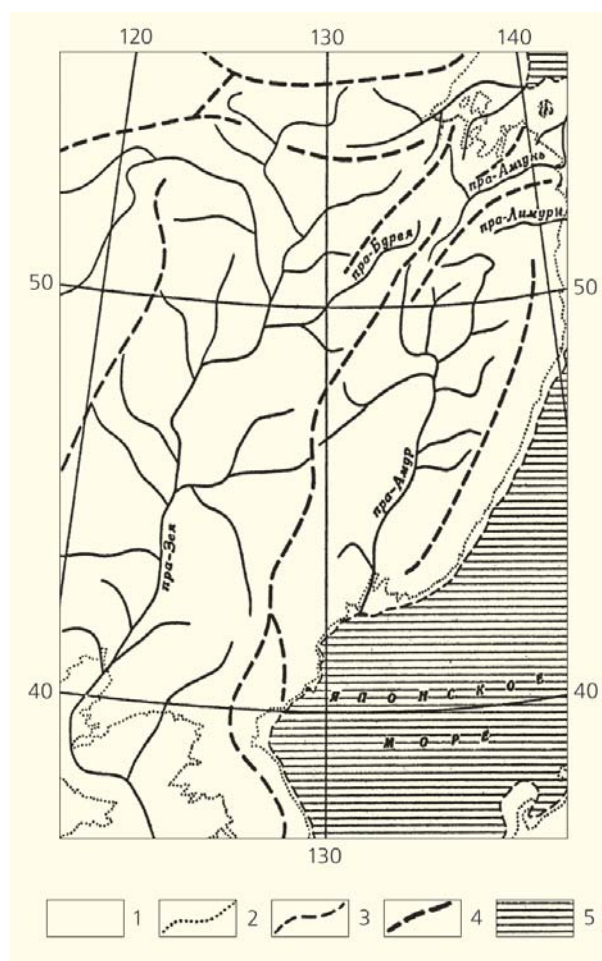


Схема реконструкции речной сети бассейна Амура в позднем неогене [9]: 1 — суша, 2 — современная береговая линия, 3 — предполагаемая древняя береговая линия, 4 — линия основных водоразделов, 5 — море.

русле пра-Амура состоит в том, что в прошлом он имел сток с севера на юг по долине р.Уссури и, пересекая оз.Ханка, впадал в Амурский залив Японского моря [9].

К настоящему времени получены новые данные о развитии природной среды в бассейнах Амура и Уссури [10, 11]. На основании биостратиграфического изучения плейстоценовых отложений в долинах современной р.Раздольной и на Приханкайской равнине сделано заключение о том, что в раннечетвертичное время на месте современного оз.Ханка располагалась обширная аллювиальная равнина, которая принадлежала в то время бассейну древней реки, впадавшей в Амур. Озеро в нынешнем виде еще не существовало, а Приханкайская равнина была покрыта лишь сетью мелких, заболоченных водоемов. На рубеже раннего и среднего плейстоцена (~1.5 млн лет назад) случилось событие, во многом определившее развитие природных комплексов региона: произошла переориентировка р.Раздольной на юг, в Японское море.

Это позволяет предположить, что исходный ареал эпигейной *Drawida* принадлежал бассейну палеорек Уссури, Илимная, Мулинхе, Раздольная и др., имевших сток на север и впадавших в Амур, как в настоящее время. Эти места обитания черной дравиды и ныне представляют собой лугово-болотные биотопы.

Кроме типичных биотопов материковой части Приамурья и Приморья в ходе последней экспедиции обследована южная часть Сахалина и Кунашира — как потенциальный ареал *Drawida*. В эпоху позднеюрмского климатического минимума (18–15 тыс. лет назад) уровень моря опустился здесь на 130 м и большая часть современного шельфа была осушена. Сахалин, Хоккайдо, острова Малой Курильской гряды, Кунашир и, возможно, Итуруп были объединены в протяженную гористую гряду, имевшую сухопутные связи с Приморьем [12]. Мы предположили, что у дравид (наряду с другими японскими элементами) была возможность заселения этой островной территории как с материковой части, так и с юга, в частности с о.Хонсю, где эти олигохеты отмечаются.

Обособление Японских о-вов от материковой части произошло во второй половине третичного периода — в плиоцене—миоцене, т.е. 12.5–27.5 млн лет назад [12], как раз в период активной экспансии монилигастрид в Юго-Восточную Азию [1]. Этим можно объяснить современное обитание на

островах девяти видов *Drawida* [3]. В частности, в переувлажненных биотопах о.Хонсю отмечается достигающий метровой длины червь, весьма похожий по окраске на нашу лугово-болотную иссиня-черную дравиду *D.battamimizu*, занесенную в Красную книгу Японии [13]. Или, например, вселенец из Китая *D.japonica*.

В результате исследований почвенных олигохет в островных биотопах (табл.) мы выяснили, что разнообразие земляных червей на Сахалине невелико, и это только люмбрициды. В отличие от сахалинской, курильская олигохетофауна включает и японские элементы (гигантских земляных червей семейства Megascolecidae), а именно несколько тропических червей *Amyntbas* spp., *Metaphire bilgendorfi* comb. nov. Мегасколециды вообще широко распространены на Кюсю, Хонсю, в южной части Хоккайдо, а также в Корее [14], поэтому обитание этих видов на Кунашире не показалось удивительным. А вот результат исследования монилигастрид получился в некотором смысле неожиданным. Несмотря на то что в лесных почвах восточного макросклона Сихотэ-Алиня в прибрежной части юга Приморья обитает два тропических семейства олигохет, их представители рода *Drawida* на обследованных нами островах обнаружены не были. С чем же связаны два таких разных результата: присутствие на ближайшем к Японии Кунашире одних видов тропического комплекса и отсутствие других?

Таблица

Земляные черви *Oligochaeta* обследованных территорий

Юг Дальнего Востока России	о.Сахалин	о.Кунашир
семейство Lumbricidae		
<i>Eisenia n. nordenskioldi</i> , Eisen, 1873	<i>Eisenia n.nordenskioldi</i> , Eisen, 1873	—
<i>Eisenia n.pallida</i> , Mal., 1956	—	—
<i>Eisenia atlavinitae</i> , Perel&Graph., 1984	—	—
<i>Eisenia fetida</i> , Sav., 1896	—	—
—	—	<i>Eisenia japonica</i> , Mich., 1891
—	—	<i>Eisenia</i> spp.
<i>Lumbricus rubellus</i> , Hoff., 1843	<i>Lumbricus rubellus</i> , Hoff., 1843	<i>Lumbricus rubellus</i> , Hoff., 1843
<i>Dendrobaena octaedra</i> , Sav., 1826	<i>Dendrobaena octaedra</i> , Sav., 1826	<i>Dendrobaena octaedra</i> , Sav., 1826
<i>Dendrodrilus rubidus tenuis</i> , Eisen, 1874	<i>Dendrodrilus rubidus tenuis</i> , Eisen, 1874	<i>Dendrodrilus rubidus tenuis</i> , Eisen, 1874
<i>Allolobophora parva</i> , Eisen, 1874	<i>Allolobophora parva</i> , Eisen, 1974	<i>Allolobophora parva</i> , Eisen, 1974
<i>Aporrectodea c.caliginosa</i> , Sav., 1826	<i>Aporrectodea c.caliginosa</i> , Sav., 1826	—
<i>Octolasion lacteum</i> , Örley, 1885	—	—
<i>Octolasion transpadanum</i> , Rosa, 1884	—	—
семейство Criodrilidae		
<i>Criodrilus lacuum</i> , Hoff., 1885	—	—
семейство Moniligastridae		
<i>Drawida ghilarovi</i> , Gates, 1969	—	—
species-complex (stat. nov.)	—	—
<i>Drawida changbaishanensis</i> , Wu&Sun, 1996	—	—
<i>Drawida nemora</i> , Kobayashi, 1936	—	—
семейство Megascolecidae		
<i>Amyntbas axillis</i> , Chen, 1946	—	<i>Amyntbas</i> spp.
—	—	<i>Metaphire bilgendorfi</i> , Mich., 1892
		species-complex (comb. nov.)

Анализ палеоклиматических данных показал, что 18–15 тыс. лет назад данный регион характеризовался довольно суровым климатом. Например, температуры воздуха на юго-востоке Сахалина, северной части Хоккайдо и Кунашире в тот период понизились на 7–8°C в летние месяцы и на 8–9°C в зимние [12]. На юге региона типичными были лесотундровые ландшафты с широким развитием многолетнемерзлотных грунтов. Поэтому, хотя в позднем вюрме (30–18 тыс. лет назад) и имелись сухопутные мосты для проникновения некоторых тропических бегающих и летающих животных на Кунашир и Сахалин как с материка,

так и с южных японских островов, суровые условия климатического минимума все-таки препятствовали расселению термофильных групп малоподвижных почвенных беспозвоночных, и в первую очередь земляных червей.

А вот широко распространенные в непромерзших почвах о.Хонсю мегасколециды, вполне вероятно, могли быть оттуда интродуцированы на Кунашир японцами в период активного хозяйственного освоения острова. И произошла такая реколонизация лишь несколько столетий назад — что значительно позже вюрмской мерзлотной стерилизации грунта. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 12-04-00221, 16-54-53052).

Литература

1. Easton E.G. Japanese earthworms: a synopsis of the Megadrile species (Oligochaeta) // Bull. Br. Mus. Nat. Hist. (Zool.). 1981. V.40. P.33–65.
2. Геймс Г.Э. Новый вид дождевого червя семейства Moniligastridae из рода *Drawida* Michaelsen, 1900 // Зоол. журн. 1969. Т.48. №5. С.674–676.
3. Blakemore R.J., Lee S., Hong-Yul Seo. Reports of *Drawida* (Oligochaeta: Moniligastridae) from far East Asia // J. Species Res. 2014. V.3. P.127–166. Doi:10.12651/JSR.2014.3.2.127.
4. Ганин Г.Н. Почвенные животные Уссурийского края. Владивосток; Хабаровск, 1997.
5. Курчева Г.Ф. Почвенные беспозвоночные советского Дальнего Востока. М., 1977.
6. Ганин Г.Н. Земляные черви *Drawida gbilarovi* Gates, 1969 (Moniligastridae, Oligochaeta): 1. Полиморфизм, распространение, особенности экологии // Амурский зоол. журнал. 2013. Т.4. С.401–404.
7. Ганин Г.Н., Анисимов А.П., Рослик Г.В. и др. Дальневосточный эндемик *Drawida gbilarovi* Gates, 1969 (Moniligastridae, Oligochaeta): полиморфизм, распространение, особенности экологии и биологии, данные о кариотипе // Зоол. журнал. 2014. Т.93. №9. С.1070–1079.
8. Atopkin D.M., Ganin G.N. Genetic differentiation of black and grey colored forms of the earthworms *Drawida gbilarovi* Gates, 1969 (Moniligastridae, Oligochaeta) on Russia Far East // Europ. J. Soil Biol. 2015. V.67. P.12–16. Doi:10.1016/j.ejsobi.2014.12.003.
9. Чемяков Ю.Ф. История развития речной сети в бассейне р.Амура // Известия АН СССР. Серия географич. 1964. №1. С.81–93.
10. Павлюткин Б.И., Ханчук А.И. Новые данные о возрасте оз.Ханка, Дальний Восток России // ДАН. 2002. Т.382. №6. С.826–828.
11. Беянина Н.И., Беянин П.С., Митюрева Е.В. Новое свидетельство переориентации стока р.Раздольной в плейстоцене, Южное Приморье // Тихоокеанская геология. 2009. Т.28. №2. С.99–102.
12. Безверхний В.Л., Плетнев С.П., Набиуллин А.А. Очерк геологического строения и развития Курильской островодужной системы и смежных территорий // Растительный и животный мир Курильских островов: Материалы Международного курильского проекта. Владивосток, 2002. С.9–22.
13. Blakemore R.J., Kupriyanova E.K., Grygier M.J. Neotipification of *Drawida battamimizu* Hatai, 1930 (Annelida, Oligochaeta, Megadrili, Moniligastridae) as a model linking mtDNA (COI) sequences to an earthworm type, with a response to the «Can of Worms» theory of cryptic species // ZooKeys. 2010. V.41. P.1–29. Doi:10.3897/zookeys.41.374.
14. Blakemore R.J. Japanese earthworms (Annelida: Oligochaeta): a review and checklist of species // Org. Divers. Evol. 2003. V.3. P.241–244.

Рыбы в горных озерах бассейна Амура

А.Л.Антонов,
кандидат биологических наук
Институт водных экологических проблем ДВО РАН
г.Хабаровск

Памяти И.Б.Книжина посвящается

В бассейне Амура преобладает горный рельеф: низкие и средневысотные горы занимают здесь более 60% [1]. В верховьях реки расположены Хэнтей-Чикойское нагорье, Яблоновый и Даурский хребты, в других частях — хребты Становой, Буреинский, Баджальский, Сихотэ-Алинь и т.д. В этих живописных районах находятся десятки озер, и в некоторых из них обитают рыбы. Исследование ихтиофауны горных районов имеет важное значение для выяснения не только ее разнообразия, но и путей ее формирования, особенностей экологии, распространения отдельных видов и их охраны.

До недавнего времени о рыбах, населяющих горные озера бассейна Амура, упоминалось лишь в двух публикациях, да и в тех говорилось только о хариусах [2, 3]. Так, в работе Г.Л.Карасева указано, что в бассейне Верхнего Амура амурский хариус (*Thymallus arcticus grubii*) может встречаться в «...гольцовых озерах, образованных сбросами и завалами» [2, с.70]. Известный исследователь хариусовых рыб Евразии Е.А.Зиновьев отмечает, что этот хариус в озерах бассейна Амура образует «озерную форму» [3, с.388]. Учитывая, что хариусы здесь обитают в горных и полугорных реках, можно предполагать, что Зиновьев имеет в виду, скорее всего, горные озера. Однако ни их названий, ни их координат оба автора не указывают. Забегая вперед, замечу, что мне не удалось встретить амурского хариуса ни в одном из обследованных горных озер и, полагая, что он вообще не может в них обитать длительное время в силу своей экологической специфики.

Известно, что горная ихтиофауна, по сравнению с равнинной, более специализирована и менее устойчива к изменениям среды [4]. Горные районы бассейна Амура в последние десятилетия подвергаются активному освоению — здесь раз-



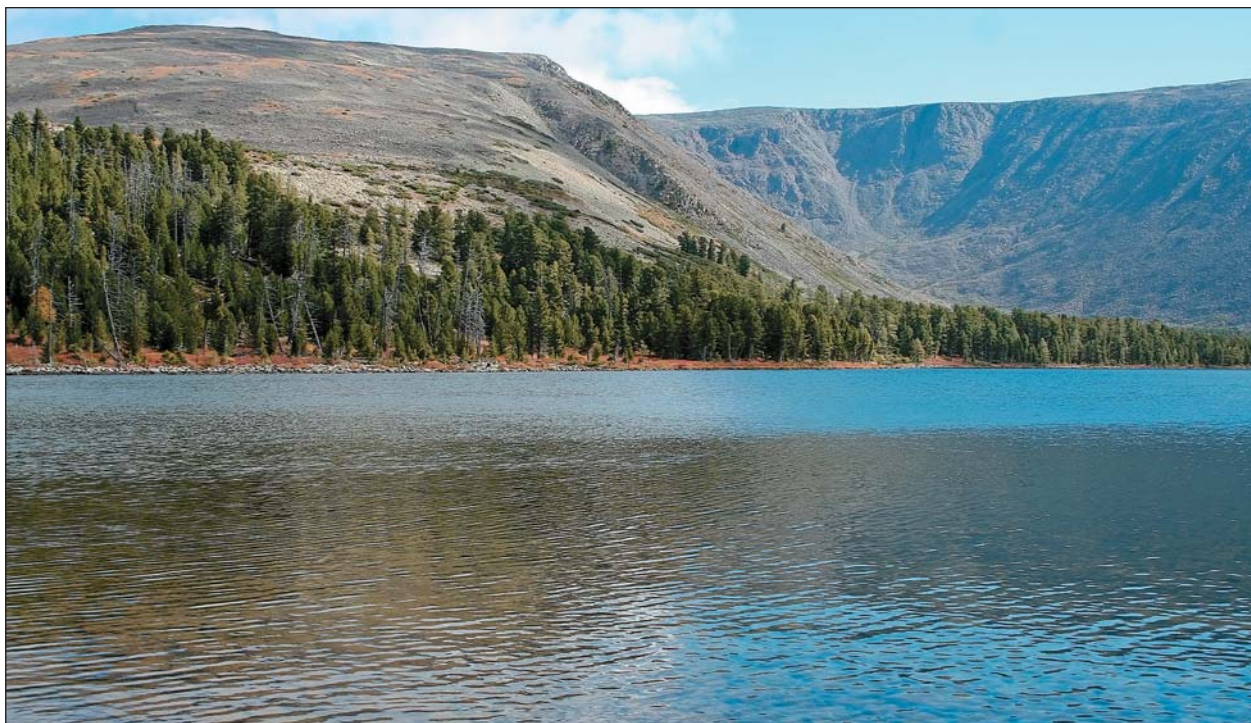
Расположение озер, в которых обнаружены рыбы: 1 — Букукунское, 2 — Оконон, 3 — Корбохон, 4 — Большой Сулук, 5 — Перевальное.

Ключевые слова: ленок тупорылый, бассейн Амура, горные озера, экология.
Key words: *Brachymystax tumensis*, Amur basin, mountain lake, ecology.

рабатываются месторождения полезных ископаемых, строятся ГЭС и формируются водохранилища, прокладываются автомобильные и железные дороги, вырубается леса, активно развивается рыболовный туризм. Все это отрицательно влияет на разнообразие рыб.

В период с 1996 по 2015 г. в различных частях бассейна Амура мы обследовали 11 сравнительно крупных горных озер (площадью более 2 га): Букукунское (в бассейне р.Онон), Оконон (в бассейне р.Зей), Корбохон, Медвежье и озеро без названия (все в бассейне р.Бурея), группу озер в бассейне р.Амгунь: Омот, Большой Сулук, Крестовое, Горное, Перевальное и безымянное в истоке р.Эбкан. Рыбы были обнаружены только в пяти из них.

Букукунское (обследовано в сентябре 2007 г.) — одно из самых больших, глубоких и высоко расположенных озер в российской части бассейна Амура. Оно находится на территории Сохондинского биосферного заповедника у подножья гольца Сохондо на высоте 1884 м, в истоке р.Букукун в бассейне р.Онон. Это красивейшее ледниково-моренное озеро сформировалось примерно 10–12 тыс. лет назад. Его площадь — 58 га, длина — около 1.6 км, ширина — 0.5 км, глубина — до 33 м [5]. На северо-востоке в озеро впадает ручей, на западе — берет начало р.Букукун. Поверхностный сток



Озеро Букукунское — жемчужина Забайкалья. Сентябрь 2007 г.

из озера прослеживается примерно на протяжении 100 м; далее, на расстоянии около 1.5 км, вода течет под валунами, а затем снова выходит на поверхность. На этом участке русло заросло травами и кустарниками, что свидетельствует о том, что оно очень редко заполняется водой.

В Букукунском озере обнаружено два вида рыб: ленок тупорылый (*Brachymystax tumensis*) и подкаменщик амурский (*Cottus zsanaga*), что составляет лишь половину видов, встречающихся в верховьях р.Букукун. В ее верхнем течении в летний период кроме этих видов обитают амурский хариус и голец сибирский (*Barbatula toni*). Казалось бы, они должны быть и в озере, но их там нет, и причины того неясны. Возможно, хариус не поднимается в самые истоки р.Букукун. По сообщениям сотрудников Сохондинского заповедника, он встречается в реке лишь в 15–20 км ниже озера, а выше, вероятно, не обитает (Г.Н.Слесаренко, личное сообщение). Голец сибирский, по нашим наблюдениям, летом может подниматься очень высоко в истоки типичных горных рек. Он найден и в некоторых других горных озерах (Корбохон, Перевальном), но в данном случае этот вид по непонятным причинам не смог заселить озеро. Наиболее обычен в озере ленок, который отличается от своего сородича, обитающего в реке, более низким телом и большими ртом, головой и глазами. В период нереста рыбы образуют стаи и концентрируются в истоке р.Букукун. Нерест ленка на озере — уникальное явление и важный объект экологического туризма в заповеднике.

Скорее всего, озерные популяции ленка и подкаменщика в существенной степени изолированы от речных. В настоящее время проникновение этих видов в озеро затруднено, так как поверхностный сток, напомним, отсутствует на значительном протяжении.

Другое озеро, в котором найдены рыбы, — Корбохон — расположено на территории Буреинского заповедника, в бассейне р.Левая Буря на западном склоне хребта Дуссе-Алинь на высоте около 1250 м. Мне удалось побывать там несколько раз (в 1996, 2002, 2006 и 2011 гг.) и хорошо его исследовать. Озеро имеет ледниковое происхождение, о чем свидетельствует морена, окаймляющая его с юга [6]. Размеры составляют около 600×400 м, глубина достигает 14 м [7]. С севера в озеро впадает ручей; с юга вытекает, прорезая морену, одноименный ручей. В его русле, в нескольких километрах ниже озера, есть участок с водопадами высотой до 1 м. В прошлом ручей был более многоводным. Ситуация изменилась, когда верхняя часть его водосбора, лежащая выше озера, была перехвачена соседним ручьем — Водопадным, относящимся к бассейну р.Амгунь, и размер водотока существенно сократился [6]. В озере обитают два вида рыб: тупорылый ленок и голец сибирский.

Впервые о рыбе из этого озера упоминалось в Проекте организации заповедника [8]. Тогда новосибирские проектировщики (среди них не было ихтиологов), обнаружив в озере ленка, ошибочно определили его как «форель, видовая принадлежность которой пока неясна» [8, с.11]. Несомненно,



Озеро Корбохон, исток ручья Корбохон. Июнь 2011 г.



Тупорылый ленок из озера Корбохон. Июнь 2006 г.

они заблуждались. Какие форели могут быть в горах Дуссе-Алиня, в истоках Буреи? Позже хабаровский путешественник и тележурналист А.Черкасов снял фильм, где показал этого ленка — на разноцветном осеннем ковре лежали небольшие красивые пучеглазые рыбки. Затем у меня были встречи с геологами, рыбаками, охотниками, и некоторые из них сообщали, что подобные большеглазые ленки обитают и в других горных озерах.

Вселение ленка и гольца в озеро Корбохон произошло, скорее всего, из р.Левая Буряя после последнего оледенения. Вытекающий из озера ручей Корбохон в этот период, до перехвата его верховий ручьем Водопадным, был, вероятно, многоводным, что позволило рыбам проникнуть в озеро. Эти же виды обитают и в вытекающем из озера

ручье Корбохон в 12–15 км ниже озера, а кроме них здесь в летнее время встречаются три вида хариусов — бурейский (*Th. burejensis*), амурский и байкало-ленский, или просто ленский (*Th. baicalo-lenensis*, или *Th. sp.**), и амурский подкаменщик. Но в озере хариусов и подкаменщика нет, что, видимо, обусловлено в основном наличием водопадов в русле ручья.

Озерные популяции ленка и гольца в существенной степени изолированы от речных. Суровость условий и изоляция отразилась на облике ленка, населяющего озеро. Он, как и ленок из озера Букукунского, существенно отличается от представителей этого вида из рек, в том числе и из р.Левая Буряя, куда впадает ручей Корбохон. Для озерного экотипа ленка в бассейне Амура, по сравнению с речными рыбами, в целом характерна большеглазость, что в первую очередь обусловлено суровостью условий. Анализ индекса отношения диамет-

* Этот хариус описан под названием байкало-ленский как подвид сибирского [9]. Однако в других источниках обоснован его видовой статус, и он назван ленским [10–13]. В данной работе не стоит задача обсуждения названия и таксономического статуса этого хариуса, поэтому автор счел необходимым указать его оба названия.

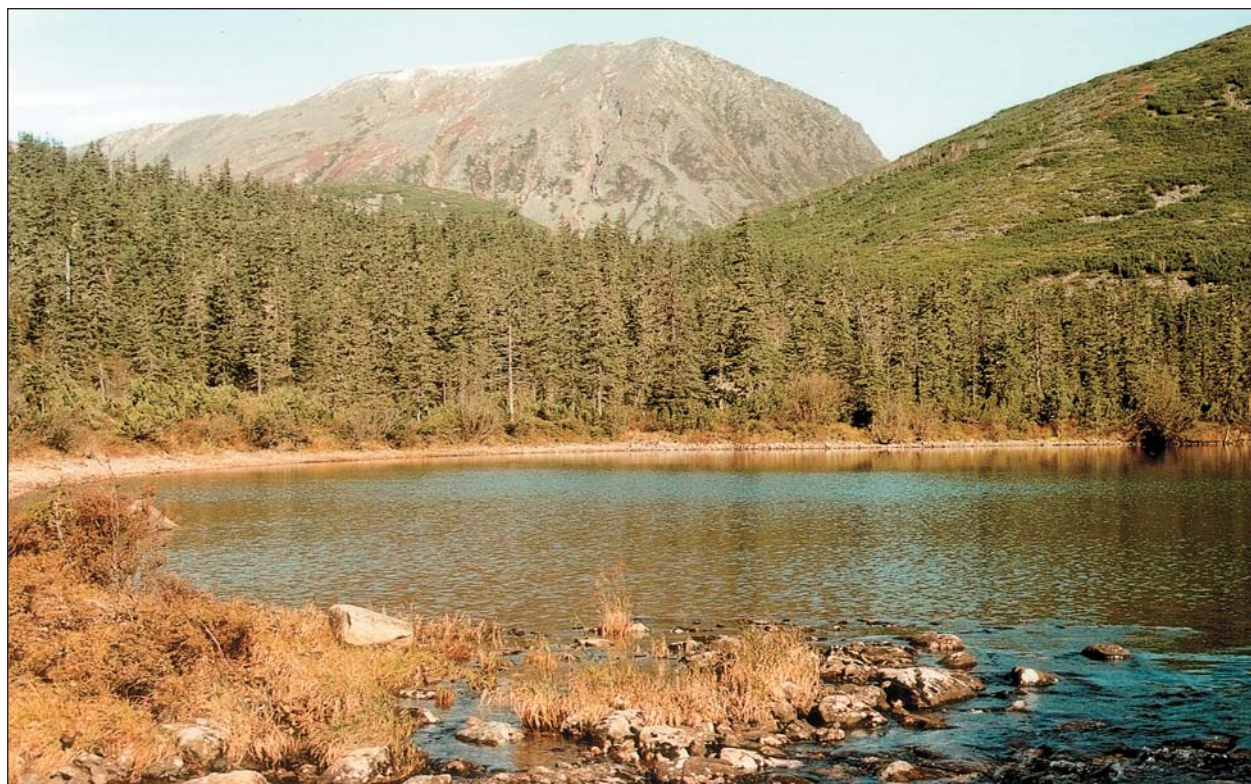
ра глаза к длине тела и головы показал, что у корбохонского ленка самые большие глаза среди озерных ленков бассейна Амура [14].

Третье заселенное рыбами озеро — Большой Сулук (обследовано в сентябре 2002 г.) лежит на высоте 1330 м в истоке р.Сулук (одного из истоков р.Амгунь) на восточном склоне Буреинского хребта. Его размеры 1300×450 м, глубина 30.8 м [15] (по другим данным — 28.5 м); происхождение связано с тектоническими процессами [16]. На юго-западе в него впадает ручей, на юге вытекает р.Сулук. Озеро интересно тем, что имеет два стока в противоположные стороны [15]. Основной (поверхностный) сток осуществляется через р.Сулук, второстепенный (подземный) — через морену, «коренную дамбу» на северо-восточном берегу озера и далее через р.Сулук-Макит, приток р.Амгунь второго порядка. В этом озере обнаружены те же виды, что и в удаленном от него более чем на 2000 км озере Букукунском, — ленок и подкаменщик. В р.Сулук, примерно в 2 км ниже озера, кроме ленка и подкаменщика найдены голец сибирский и хариус желтопятнистый (*Th. grubii flavomaculatus*). Для этих рыб в русле реки нет препятствий, однако в озере они не обитают. Отсутствие хариуса, по-видимому, обусловлено его высокой реофильностью; причины отсутствия гольца, как и в озере Букукунском, неясны.

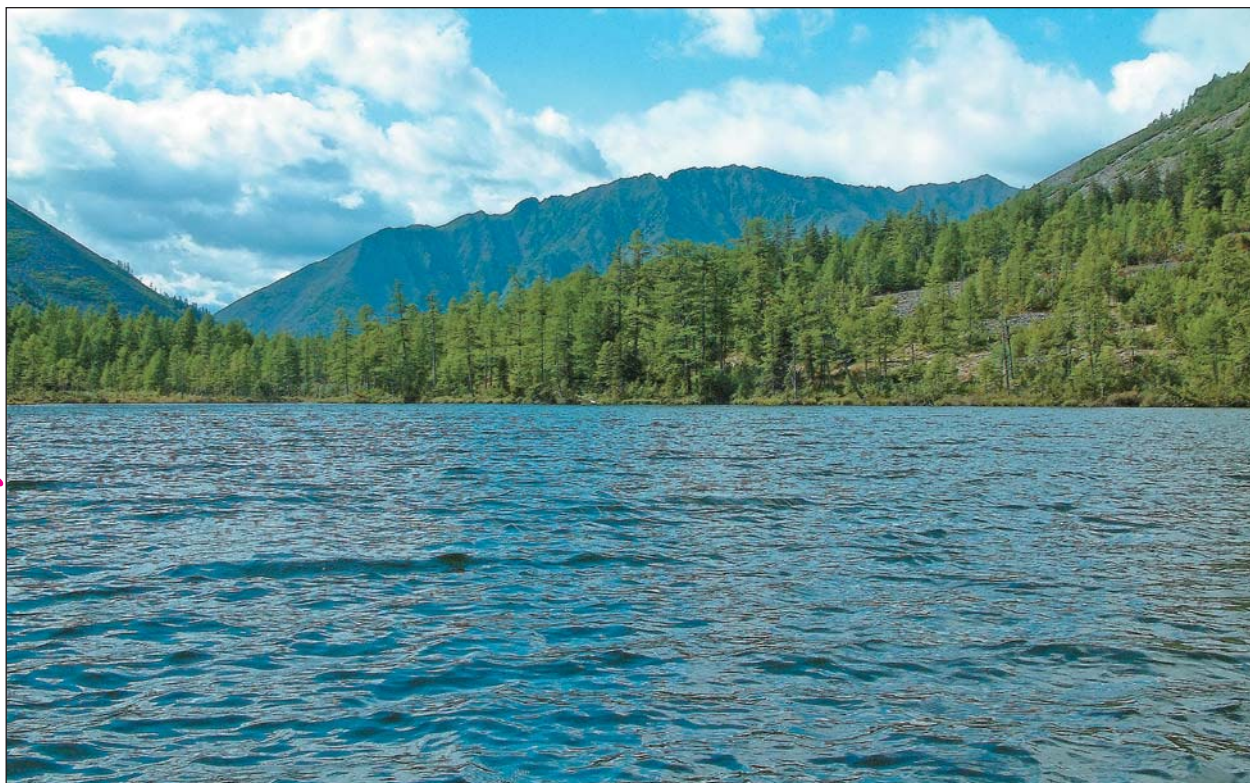
Озеро Перевальное расположено в труднодоступном районе бассейна р.Амгунь. Оно находится

в межгорном понижении хребта Меванджа на высоте около 900 м у водораздела бассейнов рек Нимелен (крупнейшего притока р.Амгунь) и Тугур. Размеры его 900×400 м; максимальная глубина, измеренная нами, составила всего 4.5 м. В северо-восточную часть озера впадает ручей, из южной вытекает приток р.Нимелен второго порядка. По предположению геоморфолога В.И.Готванского, принимавшего участие в экспедиции, понижение, в котором расположено озеро, представляет собой остатки древней долины протекавшей здесь ранее достаточно крупной реки. Вероятно, это стало причиной сравнительно высокого уровня видового разнообразия рыб в этом озере — здесь найдено четыре вида. Кроме ленка, подкаменщика и гольца, характерных обитателей других озер, был обнаружен амурский голянь (*Rhynchocypris lagowskii*). При этом он не найден в вытекающем из озера типичном горном ручье с большими уклонами русла. Это первая находка вида в горных озерах бассейна Амура. Обитание в озере Перевальном сравнительно большого числа видов, по-видимому, обусловлено более низким его расположением и историей формирования. Скорее всего, голянь в озере — реликт, остаток прежней ихтиофауны протекавшей здесь в прошлом реки, а озеро для него выполняет роль рефугиума.

Таинственный Околон (о нем упоминал известный писатель-топограф Г.А.Федосеев) в бассейне р.Зея удалось обследовать в июне–июле 2014 г. Это



Озеро Большой Сулук. Сентябрь 2002 г.



Озеро Перевальное. Август 2006 г.

озеро лежит на высоте 1323 м на южном склоне Станового хребта, у восточной границы Окононского плато в верховьях р.Малый Оконон. Оно, вероятно, имеет тектоническое происхождение; площадь его составляет около 1 км² [17]. Глубина в восточной части достигает 17,5 м, а по данным почвоведческой экспедиции Н.И.Прохорова 1911 г. — «27 сажен» [18]. Каких-либо водотоков в него не впадает. Берега озера, в отличие от других обследованных озер, сравнительно пологие, поросшие лиственным лесом. В западной части имеются отмели с прибрежной растительностью. В 15 м к северо-западу расположено малое озеро, его площадь около 2,5 га. На западном берегу озера Оконон есть понижение, через которое осуществляется скрытый сток — примерно в 200 м к западу от берега вода выходит на поверхность ручьем, который впадает в р.Малый Оконон. Русло реки ниже впадения этого притока пересыхает ежегодно на протяжении около 2 км (Н.И.Абоимов, личное сообщение); в начале июля 2014 г. на этом участке сохранились лишь небольшие изолированные водоемы. В окрестностях озера на плато есть группа небольших термокарстовых озер.

По видовому составу рыб Оконон резко отличается от других озер. Здесь обнаружено всего два вида — гольян Чекановского (*Rh. czekanowskii*) и байкало-ленский хариус, отсутствующие в других озерах. Оба вида найдены впервые в горном озере бассейна Амура. Хариус обнаружен и в р.Малый

Оконон (ниже пересыхающего участка), и в ручье со скрытым стоком. Ниже этого участка обитают также тупорылый ленок, амурский хариус, голец сибирский, подкаменщик амурский. Таким образом, в озере Оконон из ихтиофауны верховий р.Малый Оконон встречается только один вид — байкало-ленский хариус. Гольян Чекановского найден не только в этом озере, но и в соседнем; в обоих озерах численность его высока. Он населяет и небольшие термокарстовые озера на Окононом плато в бассейнах рек Накит и Малый Оконон, удаленные от озера Оконон на 5–15 км.

Хариус проник в озеро Оконон, по-видимому, из р.Малый Оконон. Озерная популяция гольяна Чекановского, вероятно, сформировалась в результате вселения рыб из соседних озер, но могло быть и наоборот — гольян попал в них из озера Оконон. Интерес представляет отсутствие в этом озере ленка, подкаменщика и гольца — видов, которые населяют другие обследованные водоемы и обитают в верховьях р.Малый Оконон.

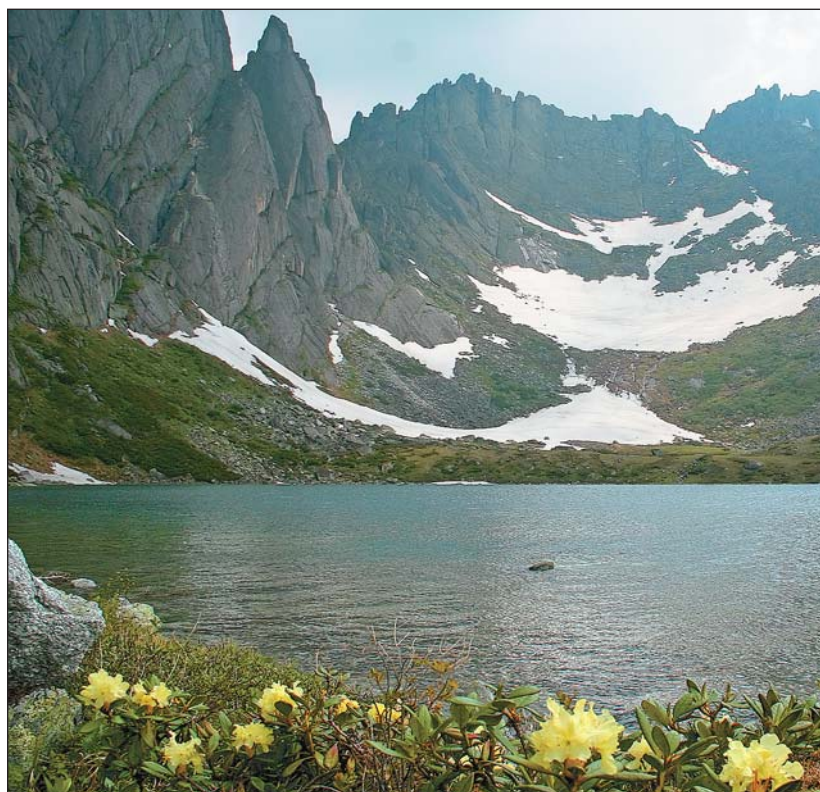
Таким образом, рыбы найдены только в пяти из 11 озер. Основными причинами отсутствия рыб в других озерах могло стать наличие водопадов на вытекающих водотоках, отсутствие поверхностного стока из озер на значительном протяжении и, возможно, малый размер вытекающего водотока. Всего в озерах обнаружено шесть видов рыб. Четыре из них — ленок тупорылый, голец сибирский, подкаменщик амурский и хариус байкало-



Озеро Оконост. Июль 2014 г.

ленский — типичные обитатели верховий горных рек на большей части бассейна Амура. Проникновение их из рек в озера, скорее всего, произошло в периоды после последних оледенений, т.е. несколько тысяч лет назад. Обитание в двух озерах других видов — голянов амурского и Чекановского — носит реликтовый характер, так как они в настоящее время не обитают в верховьях типичных горных рек бассейна Амура, в том числе в районах озер. В целом ихтиофауна озер представляет обедненный вариант ихтиофауны верховий рек амурского бассейна. Наиболее богата фауна (четыре вида) в самом низкорасположенном озере — Перевальном в бассейне р.Амгунь.

Тупорылый ленок из горных озер, в отличие от рыб этого вида из рек, имеет некоторые особенности морфологии и экологии, замедленный рост и мелкие размеры, что позволяет выделить у этого вида два экотипа: речной и озерный.



Буреинский заповедник, озеро Медвежье — одно из самых живописных горных озер в бассейне Амура. К сожалению, рыбы в нем нет.

Эти шесть видов рыб, несмотря на суровые климатические условия в районах озер, пространственную ограниченность и высокую уязвимость, смогли приспособиться к обитанию в бедных питательными веществами (ультраолиготрофных) горных озерах и сформировали здесь устойчивые ихтиоценозы.

В настоящее время в бассейне Амура ихтиоценозы горных озер охраняются лишь в двух заповедниках — Сохондинском (здесь расположено

озеро Букукунское) и Буреинском (озеро Корбохон) и одном заказнике областного значения — Токинском имени Г.А.Федосеева (озеро Онон). Остальные озера и их обитатели никак не охраняются. В горах амурского водосбора имеются еще не исследованные озера в бассейнах рек Онон, Ингода, Зея, Селемджа, Урми, Горин, Анюй. Необходимо проведение всесторонних исследований горных озер, создание здесь новых особо охраняемых природных территорий. ■

Работа выполнена при поддержке ДВО РАН (проекты 03-3А-06-012, 06-ИПД-06-247, III-Д-06-006; комплексная программа «Амур»).

Выражаю глубокую благодарность за помощь в полевых исследованиях В.И.Готванскому, В.П.Шестеркину, А.Ю.Олейникову, Э.В.Аднагулову (ИВЭП ДВО РАН), Г.Н.Слесаренко (Сохондинский заповедник), А.Ф.Былкову (Хинганский заповедник); за информацию — Н.И.Абоимову (пос. Бомнак Амурской обл.); за определение возраста ленков из озера Корбохон — С.С.Алексееву (ИБР РАН); за помощь в организации экспедиций в горные районы — В.И.Яшинову и Е.Э.Малкову (Сохондинский заповедник), А.Д.Думиакну (Буреинский заповедник) и В.С.Приходько (ИТиГ ДВО РАН).

Литература

1. Никольская В.В. Морфоскульптура бассейна Амура. М., 1972.
2. Карасев Г.Л. Рыбы Забайкалья. Новосибирск, 1987.
3. Зиновьев Е.А. Экотипы у хариусовых рыб (Thymallidae, Salmoniformes) // Экология. 2005. №5. С.385–389.
4. Никольский Г.В. Основные закономерности формирования и развития речной ихтиофауны // Очерки по общим вопросам ихтиологии. М.; Л., 1953. С.77–90.
5. Малая энциклопедия Забайкалья. Природное наследие. Новосибирск, 2009.
6. Готванский В.И. Материалы к геоморфологии Буреинского заповедника // Тр. государственного природного заповедника Буреинский. Вып.2. Хабаровск, 2003. С.7–10.
7. Шестеркин В.П., Антонов А.Л. Ледниковые озера Дуссе-Алиня // Первые Гродековские чтения. Ч.3. Хабаровск, 1996. С.70–71.
8. Проект организации государственного заповедника «Буреинский». Новосибирск, 1984.
9. Матвеев А.Н., Самусенок В.П., Тельпуховский Н.М. и др. Новый подвид сибирского хариуса *Thymallus arcticus baicalolenensis* ssp. nova (Salmoniformes, Thymallidae) // Вестник Бурятского ун-та. Сер.2. Биология. 2005. Вып.7. С.69–82.
10. Книжнин И.Б., Кириллов А.Ф., Вайс С.Дж. К вопросу о разнообразии хариусов (*Thymallus*, Thymallidae) в бассейне реки Лены // Матер. междунар. науч. конф. «Фауна Казахстана и сопредельных стран на рубеже веков: морфология, систематика, экология». Алма-Ата, 2004. С.144–145.
11. Weiss S., Knizhin I., Kirillov A., Froufe E. Phenotypic and genetic differentiation of two major phylogeographical lineages of arctic grayling *Thymallus arcticus* in the Lena river and surrounding Arctic drainages // Biol. J. Linn. Soc. 2006. V.88. P.511–525.
12. Книжнин И.Б., Кириллов А.Ф., Вайс С.Дж. К вопросу о разнообразии и таксономическом статусе хариусов (*Thymallus*, Thymallidae) реки Лена // Вопр. ихтиол. 2006. Т.46. №2. С.182–194.
13. Книжнин И.Б. Хариусы (*Thymallus* Cuvier, 1829) Голарктики (систематика, филогеография, особенности экологии): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2009.
14. Антонов А.Л. Морфо-экологические особенности тупорылого ленка *Brachymystax tumensis* Mori, 1930 из озера Букукунского (бассейн р. Онон) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2009. Т.2. №1. С.62–65.
15. Круглов М.В. Маршрутные геологические наблюдения в северо-восточной части Буреинского хребта // Амгунь-Селемджинская экспедиция АН СССР. Ч.1: Буреинский отряд. Л., 1934. С.25–70.
16. Сазыкин А.М., Рябинин Е.Н. Происхождение котловины озера Большой Сулук (Буреинский хребет) // Дальний Восток России: география, гидрометеорология, геоэкология // Материалы седьмой научной конференции «К всемирным дням воды и метеорологии». Владивосток, 21–22 марта 2005 г. Владивосток, 2006. С.75–78.
17. Верхний и Средний Амур // Ресурсы поверхностных вод СССР. Л., 1966. Т.18. Вып.1.
18. Готванский В.И., Сальникова Н.Н. Вулканогенный рельеф Токинско-Туксанийского междуречья (Становой хребет) // Вопр. геогр. Дальнего Востока. Сб.18: Региональная и прикладная геоморфология Приамурья Хабаровск, 1977. С.3–11.

Как каменная монетка стала «золотой»

В.Н.Комаров,

кандидат геолого-минералогических наук
Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ)

Г.В.Агафонова,

кандидат геолого-минералогических наук
Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт

Е.В.Ковальчук

Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН
Москва

В 2016 г., во время прохождения Крымской учебной геологической практики, студент МГРИ-РГГРУ П.Э.Синкин на южном склоне горы Сувлу-Кая в нуммулитовых известняках симферопольской свиты эоцена нашел пиритизированную раковину *Nummulites* sp. очень хорошей сохранности.

Нуммулитиды (от латинского *nummulos* — монетка) представляют собой группу простейших организмов, характеризующихся известковой спирально-плоскостной монетовидной раковиной. Они служат породообразующим материалом — в конечном итоге из их скелетов могут формироваться известняки.

Превращение остатков погибших организмов в окаменелости — фоссилизация (от латинского *fossilis* — ископаемый) — процесс сложный и длительный. Физико-химические явления, включающие осаждение вещества из воды и более поздние многочисленные события, приводят к возникновению агрегатов различных аутигенных (образованных на месте) компонентов, которые заполняют пустоты в скелетах либо заменяют их исходное вещество. По первому пути идет минерализация остатков, по второму — процесс замещения. Минерализация и замещение часто начинаются сразу же после гибели организма и про-



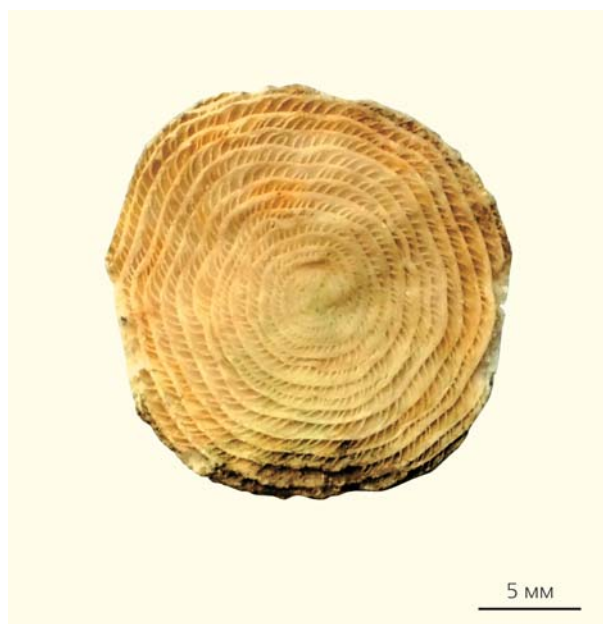
Выходы нуммулитовых известняков симферопольской свиты на южном склоне горы Сувлу-Кая.

Здесь и далее фото авторов

Ключевые слова: фоссилизация, фрамбоидальный пирит, нуммулиты, эоцен, Горный Крым.

Key words: fossilization, framboidal pyrite, nummulitida, Eocene, Mountain Crimea.

должаются на стадии формирования местонахождения в зоне седиментации и литификации осадка, а также при его разрушении под действием метаморфизма, выветривания и других процессов. В результате остатки, преобразованные фоссилизирующими минералами, часто становятся псевдоморфозами (т.е. сохраняют прежнюю форму, чуждую слагающему их веществу).



Нуммулитиды — каменные монетки (слева) и поперечное сечение раковины.

Число аутигенных компонентов, принимающих участие в заполнении пустот и в замещении вещества остатков организмов, в карбонатных отложениях невелико. Это кальцит и доломит, в меньшей степени сульфатные минералы (гипс, ангидрит), кварц и другие минеральные формы кремнезема, пирит, глауконит, оксиды и гидроксиды железа.

Главный аутигенный железистый минерал карбонатных отложений — пирит (FeS_2), основная масса которого образуется на ранних стадиях диагенетического перераспределения вещества в осадке. Об этом минерале в прошлом году подробно рассказывалось и на страницах «Природы»*. Интереснейшую форму кристаллизации пирита представляют собой фрамбоиды — сфероидальные агрегаты, сложенные многочисленными плотно упакованными кристаллитами, приблизительно равными по форме и размеру. Кристаллиты, как правило, идиоморфны, т.е. образуют кубы, октаэдры, пентагондодекаэдры и их комбинации. Диаметр отдельных фрамбоидов колеблется от 1 до 250 мкм, но размеры крупнее 50 мкм редки. В одной сфере содержится 10^2 – 10^6 микрокристаллов размером от 0.2 до 2 мкм, с отношением диаметров фрамбоида и кристаллита от 5 до 30 [1].

Фрамбоиды весьма часто встречаются в осадочных породах различного возраста. Они — доминирующая форма пирита в современных илистых морских или озерных отложениях, в осадках соленых болот, образующихся в аноксихных условиях, а также в водной массе современных аноксихических бассейнов.

Общепринятого мнения о механизме образования фрамбоидального пирита до сих пор нет [2–4]. Считается, что он формируется на стадии раннего диагенеза в восстановительных геохимических условиях ниже границы раздела осадка с поверхностными водами, в местах разложения органического вещества. Сульфатредуцирующие бактерии, восстанавливая сульфаты морской воды, используют для окисления органического вещества кислород молекулы CaSO_4 . Двухвалентный ион серы реагирует с ионом водорода (всегда присутствующим в природных водах в результате диссоциации воды), образуя биогенный сероводород. Последний взаимодействует с ионами растворенного двухвалентного железа, которые содержатся в поровых водах окружающего осадка. Это приводит к образованию моносulfида железа, кристаллизация которого через ряд промежуточных стадий завершается формированием пирита. Таким образом, возникновение фрамбоидов — биологически индуцированный процесс, что подтверждается их частым нахождением внутри раковин радиолярий и мелких фораминифер, диатомовых фрустул, трубок полихет и клеток растений.

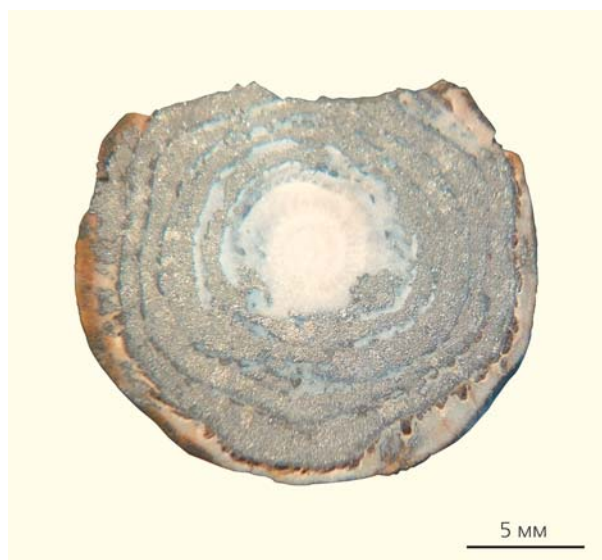
Однако мы не смогли обнаружить публикаций, свидетельствующих о находках пирита в раковинах нуммулитов. Ни разу не встречались нам их пиритизированные остатки и за многие годы проведения Крымской практики.

Итак, мы приступили к изучению нашей находки. Анализ образца проводился в лаборатории физических методов исследования руд и минералов МГРИ-РГГРУ методом рентгенографии на приборе ДРОН-3М (аналитик А.В.Фёдоров), а так-

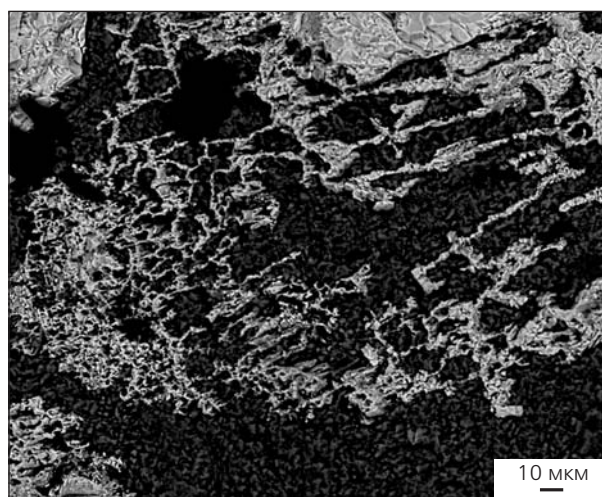
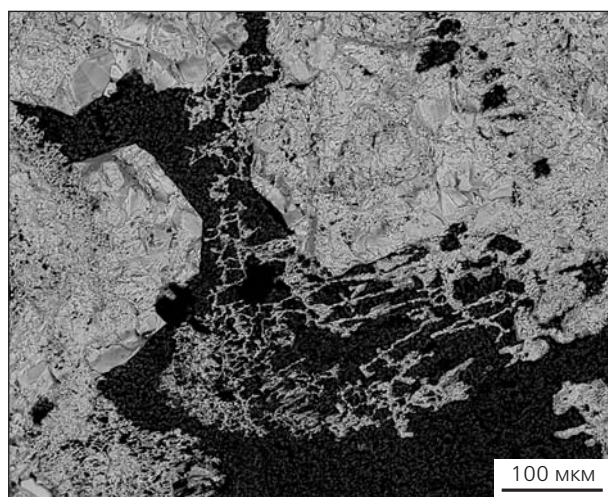
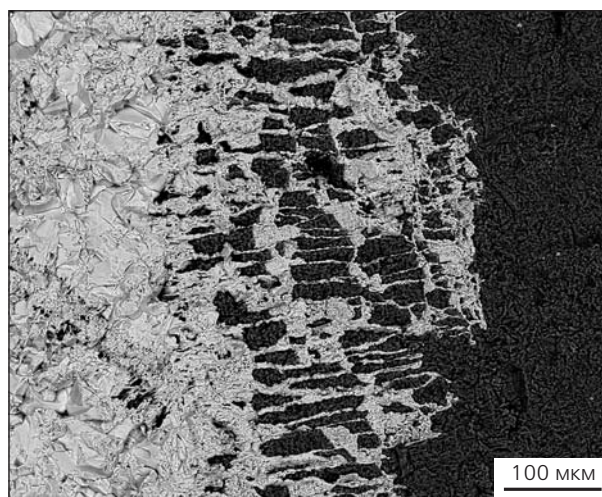
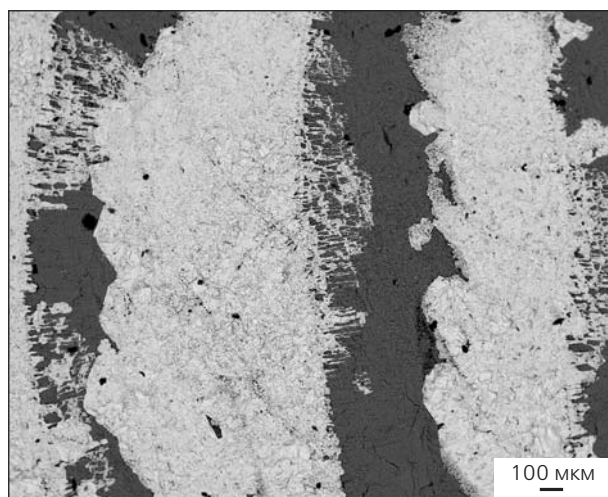
* Кизильштейн Л.Я. Сульфатвосстанавливающие бактерии: великие дела маленьких существ // Природа. 2016. №2. С.51–53.

же в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL-8200. Полученные данные соответствуют двум минералам — пириту и кальциту.

Проведенное исследование показало, что интенсивность пиритизации раковины отчетливо уменьшается от внешнего оборота к внутренним. Центральная часть раковины (на долю которой приходится примерно 25% от ее общего диаметра) с несколькими внутренними оборотами пиритизацией совершенно не затронута. Камеры при этом частично заполнены аутигенным кальцитом. В пределах средних оборотов полностью пиритизированные участки чередуются с сохранившимися первичными карбонатными фрагментами стенки раковины и септ. Границы между ними четкие, неровные. Внешние обороты (на долю которых приходится примерно 35% диаметра раковины) демонстрируют практически полную пиритизацию раковинного вещества. Сохранились лишь редкие реликты оборотов.



Поперечное сечение пиритизированной раковины нуммулита.



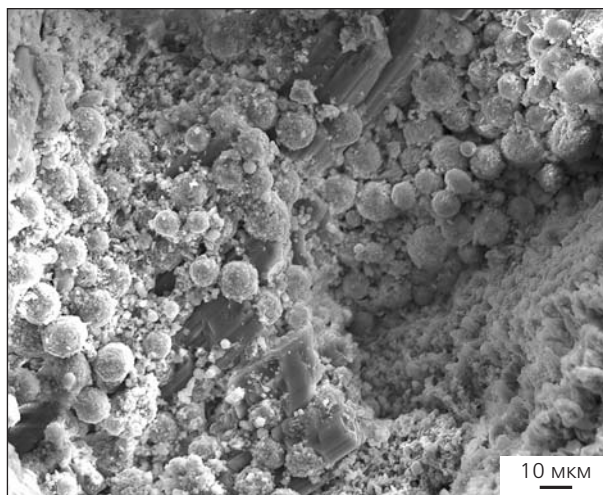
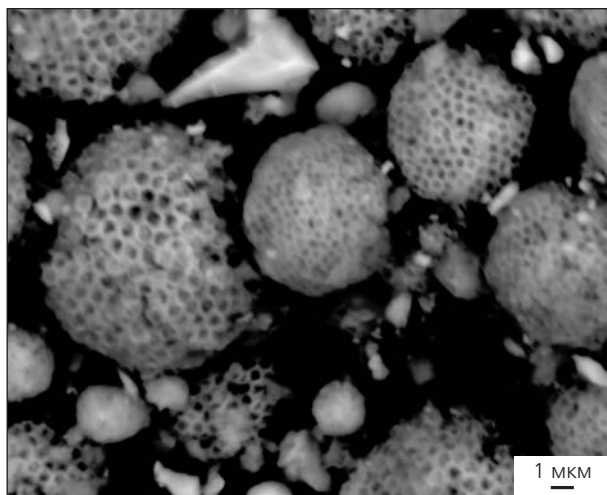
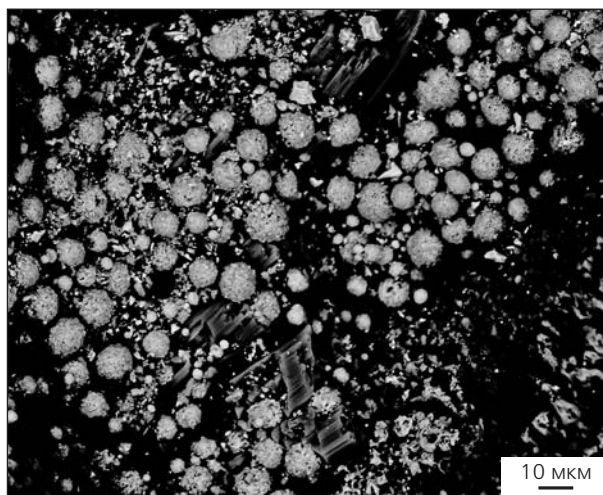
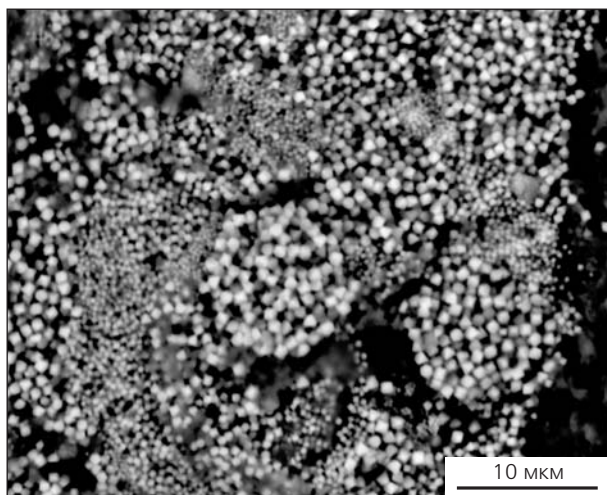
Замещение карбоната раковины *Nummulites* sp. (темное) агрегатами пирита (светлое). Микрофотографии в обратноотраженных электронах.



Лимонитизированная пиритовая конкреция диаметром 7 см в эоценовых нуммулитовых известняках на южном склоне горы Сувлу-Кая.

Септы, насколько можно судить, почти полностью замещены сульфидом и потеряли индивидуальность. Заполнено пиритом и почти все пустотное пространство этой части скелета. Только в пределах последнего оборота наблюдалось несколько свободных от пирита камер и сохранившихся септ. Отметим, что именно в этой части раковины в виде небольших локальных очагов встречался лимонит (смесь различных гидроксидов железа), в который, окисляясь, превратился пирит. В изученном образце обнаружено два морфологических типа пирита — фрамбоиды и сростки и скопления кристаллов.

Сульфидная минерализация в осадочных породах Горного Крыма довольно хорошо изучена. Однако в большом комплексном минералого-геохимическом исследовании пиритов фрамбоиды дисульфида железа описаны не были [5]. Таким образом, наша находка, по всей видимости, — первое обнаружение не только пирита в раковине нуммулита, но и фрамбоидального пирита в Горном Крыму.



Фрамбоиды пирита. Микрофотографии в обратноотраженных электронах.

Фрамбоидальные образования очень разнообразны и сложены как россыпями кристаллитов, формирующих фрамбоиды, так и отдельными фрамбоидами, которые можно отнести к двум композиционным разновидностям.

Первая представлена фрамбоидами с рыхлой микроструктурой. Слагающие их кристаллиты, как правило, характеризуются октаэдрической формой и схожими размерами в пределах одного фрамбоида. Иногда некоторые кристаллиты при взгляде со стороны вершины, в которой сходятся четыре треугольные грани, обманчиво выглядят прямоугольниками. Фрамбоиды данной композиционной разновидности представлены двумя генерациями, кристаллизация которых, по всей видимости, происходила в разное время. Фрамбоиды ранней генерации обладают сравнительно большой (от 5 до 10.83 мкм, преобладающий размер 10.33–10.83 мкм) сферической структурой. Они сложены относительно крупными (от 0.48 до 1 мкм, преобладающий размер 0.8–0.87 мкм) кристаллитами. Фрамбоиды поздней генерации имеют небольшую (от 1.25 до 2.08 мкм) сферическую структуру. Состоят они из микроиндивидов размером от 0.26 до 0.46 мкм (преобладающий размер 0.26–0.33 мкм).

Вторую композиционную разновидность образуют фрамбоиды с плотной микроструктурой. Они состоят из кристаллитов пентагонального габитуса, размер которых в пределах одного фрамбоида практически одинаков. Подобные фрамбоиды наблюдаются в виде правильных сферических и изредка овальных образований размером от 3 до 15.7 мкм. Величина отдельных кристаллитов варьирует от 0.3 до 1.08 мкм (преобладающий размер 0.3–0.56 мкм).

В скоплениях и сростках наблюдаются кристаллы пирита размером до 150 мкм. Хорошо оформленные кубические кристаллы встречаются редко. Крупные кристаллы собраны вместе и образуют

поля. Иногда встречаются мелкозернистые агрегаты, а в ряде случаев — сплошная пиритовая масса.

Таким образом, изученный материал позволяет выделить пирит двух генераций: наиболее ранний диагенетический фрамбоидальный, связанный с раскристаллизацией первичных сульфидов железа, и скопления идиоморфных кристаллов. Последние, по всей видимости, могли возникнуть на основе пиритовых фрамбоидов. Такие кристаллы, скорее всего, представляют собой поздние продукты их перекристаллизации. Подобная последовательность смены форм пирита, когда в условиях увеличения концентрации сероводорода в растворе фрамбоиды служат центром роста идиоморфных кристаллов, подтверждается рядом исследований [6, 7]. В то же время причудливая форма скоплений идиоморфных кристаллов пирита и многочисленные неровные реликты кальцита внутри них, безусловно, свидетельствуют о более поздней метасоматической природе значительного количества дисульфида железа, который заполнил полости в раковине нуммулита и заместил его скелет.

Вот так каменная монетка со временем стала «золотой». Пирит иногда называют «золотом дураков» из-за внешнего сходства с самородками драгоценного металла, что часто вводило в заблуждение неопытных золотоискателей.

Единственная обнаруженная до настоящего времени раковина нуммулита, которая содержит фрамбоиды пирита, может свидетельствовать о чрезвычайной редкости нужных для их образования локальных очагов восстановительных условий.

Полученные новые данные расширяют наши представления о проявлениях процесса фоссилизации. Они будут полезны при определении связи кристаллографических модификаций фрамбоидов с внешней средой, а следовательно, и при установлении критериев биогенности встречаемых фрамбоидальных структур. ■

Литература

1. Soliman M.F., El Goresy A. Framboidal and idiomorphic pyrite in the upper Maastrichtian sedimentary rocks at Gabal Oweina, Nile Valley, Egypt: Formation processes, oxidation products and genetic implications to the origin of fromboidal pyrite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. V.90. P.195–220.
2. Астафьева М.М., Розанов А.Ю., Хувер Р. Фрамбоиды: их структура и происхождение // *Палеонтологический журнал*. 2005. №5. С.3–9.
3. Кизильштейн Л.Я. Фрамбоидальный пирит причастен к возникновению жизни на Земле? // *Природа*. 2007. №1. С. 49–54.
4. Кизильштейн Л.Я., Минаева Л.Г. Происхождение фрамбоидальных форм пирита // *ДАН СССР*. 1972. Т.206. №5. С.1187–1189.
5. Седаева К.М., Майорова Т.П., Устюгова К.С. и др. Пирит осадочных и магматических комплексов Горного Крыма и его минералого-геохимическая характеристика // *Вестник МГУ. Серия 4: Геология*. 2013. №5. С.45–56.
6. Асочакова Е.М., Бухарова О.В. Микровключения в оолитовых железных рудах Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) // *Вестник ТГУ*. 2013. №369. С.168–172.
7. Шнюков Е.Ф., Сокол Э.В., Козьменко О.А. и др. Нафтиды в тектонической брекчии Ломоносовского подводного массива, Черное море // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2012. №4. С.34–50.

Иодо — скала раздора в Восточно-Китайском море

В.В.Глушков,
доктор географических наук
Российский университет дружбы народов
Москва

Иодо (по-китайски Суян) — это подводная скала в Восточно-Китайском море*, расположенная в 149 км к юго-западу от южнокорейского острова Марадо, в 247 км от ближайшего китайского острова Тунтао и примерно в 450 км от японского острова Кюсю. Вершина скалы скрыта под водой на глубине 4.6 м, и увидеть ее можно только во время шторма. Основание скалы диаметром 1820 м находится на глубине 60 м [1].

Слава этого рифа всегда была мрачной. Древние легенды гласят, что на нем живут души погибших моряков. Поговорки вроде *увидеть Иодо* или *отправиться жить на Иодо* для корейских рыбаков означали «умереть». Действительно, внезапно обнажившаяся в шторм подводная скала часто бывала последним, что видели в жизни мореплаватели прошлых столетий, путешествующие на небольших деревянных судах.

Скала Иодо была открыта случайно в 1900 г. На нее наскочил британский торговый корабль «Сокотра». Морякам повезло — поврежденное судно не затонуло. Скалу нанесли на карту, предварительно определив ее координаты, и дали ей наименование Сокотра**. Более обстоятельно риф был обследован британским исследовательским кораблем «Морская ведьма» в 1910 г.

Изучение Иодо и окружающего ее водного пространства началось в 1950-х годах, после окончания Корейской войны 1950–1953 гг. В 1984 г. ученые-гидрографы из южнокорейского Университета Чечжу провели комплексное исследование этого района Восточно-Китайского моря, а в 1987 г. на скале был установлен сигнальный буй.

* Упомянутое море на картах окружающих стран называется по-разному. Например, по-китайски это Дунхай, или Восточное море, по-корейски — Намхэ, или Южное море. Японцы с 2004 г. называют его Морем восточной стороны.

** В Индийском океане у побережья Сомали есть архипелаг, также носящий имя Сокотра.

Ключевые слова: скала Иодо, территориальный спор, Республика Корея, Китай, Япония.
Key words: Iodo rock, territorial dispute, Republic of Korea, China, Japan.

О существовании скалы Иодо корейцы знают давно и столь же давно считают ее своей, ведь географически она находится ближе к Корейскому п-ову, чем к материковому Китаю и островной Японии. Однако на право обладать подводной скалой претендуют и китайцы***. Они тоже с давних пор считают ее своей. Риф Суян был известен китайским рыбакам еще несколько тысячелетий назад. В XIX в. он был нанесен на карты как часть территории Китая. Корейцы с этим фактом не согласны, поскольку известно, что в 1963 г. на рифе потерпело крушение китайское судно. Произошло это потому, что на китайской лоцманской карте риф Суян нанесен не был. Только после кораблекрушения премьер Госсовета КНР Чжоу Эньлай распорядился провести гидрографические исследования акватории, расположенной близ этого злосчастного рифа [1, 2].

Китайская сторона утверждает, что риф Суян — это *естественное продолжение континентального шельфа* КНР. По нормам международного права такое заявление может стать серьезным аргументом в пользу одной из спорящих сторон. Это утверждение корейцы тоже ставят под сомнение, ведь доказательств *естественного продолжения* китайцы не предоставили (по российскому опыту в Арктике известно, что дело это чрезвычайно щепетильное и сложное). Корейцы же, напротив, вполне преуспели в изучении дна Восточно-Китайского моря: по результатам анализа проб грунта они сделали вывод о сходном геологическом строении морского дна в районе скалы Иодо и ближайшего южнокорейского острова Чечжудо [2].

В Конвенции ООН о континентальном шельфе 1958 г. сказано: *Если один и тот же континентальный шельф примыкает к территории двух или нескольких государств, берега которых расположены один против другого, границы между шельфами определяются соглашением между ними. В случае если соглашение отсутствует и если нет особых обстоятельств, которые оправдывали бы установление иной линии границы, границей между шельфами является срединная линия, каждая точка которой отстоит на рав-*

*** Китайцы претендуют еще на 300 островов в Восточно-Китайском, Южно-Китайском и Желтом морях.

ном расстоянии от ближайшей точки исходной линии, от которой отсчитывается ширина территориального моря* каждого из государств [3]. Если шельф будет разделен по срединной (равнотстоящей) линии, скала Иодо окажется в пределах южнокорейской территории.

Однако в Конвенции ООН по морскому праву 1982 г., подписанной 159 странами (в том числе Республикой Корея и КНР) и вступившей в действие в 1994 г., термин *срединная линия* уже не упоминается. Конвенция не обязывает государства применять этот метод для установления границы как нововведенной 200-мильной (370-километровой) исключительной экономической зоны (ИЭЗ), так и континентального шельфа.

Тем не менее Конвенцию ООН 1958 г. никто не отменял, а Международный суд ООН в Гааге все-таки рекомендует спорящим странам решать проблему делимитации континентального шельфа методом срединной линии. Так, этот метод был успешно использован в спорах и последующих соглашениях между СССР и Финляндией в Финском заливе Балтийского моря, между Великобританией и Норвегией, Великобританией и Голландией, Великобританией и Данией в Северном море [4].

После ратификации Конвенции ООН по морскому праву 1982 г. оказалось, что в районе скалы Иодо перекрываются ИЭЗ трех стран — Республики Корея, Китая и Японии. Для урегулирования возникших разногласий необходимо выполнить делимитацию ИЭЗ и подписать трехстороннее соглашение в соответствии с требованиями международного права. Однако этот вопрос все еще остается на стадии обсуждения. Тем временем на официальном сайте Министерства транспорта КНР сказано, что риф Суян находится в китайской ИЭЗ.

Южная Корея обладает многолетним опытом отстаивания своих прав на острова Токто, которые японцы захватили в 1905 г. и потеряли в 1945-м. Исходя из этого опыта, южнокорейская сторона приняла решение установить на Иодо свою морскую платформу. Она была построена в 2003 г. На платформе высотой 80 м (из которых 36 м возвышаются над морской поверхностью) разместилась вертолетная площадка и универсальная научная морская база, включающая маяк, ретранслятор, автоматическую метеорологическую станцию, солнечные батареи и другие элементы. На строительство всей этой инфраструктуры израсходовано около 23 млрд южнокорейских вон (или 19 млн долл. США) [5]. По мнению южнокорейских ученых, современная научная база на Иодо позволяет, наряду с разведкой природных ресурсов, вносить значительный вклад в изу-

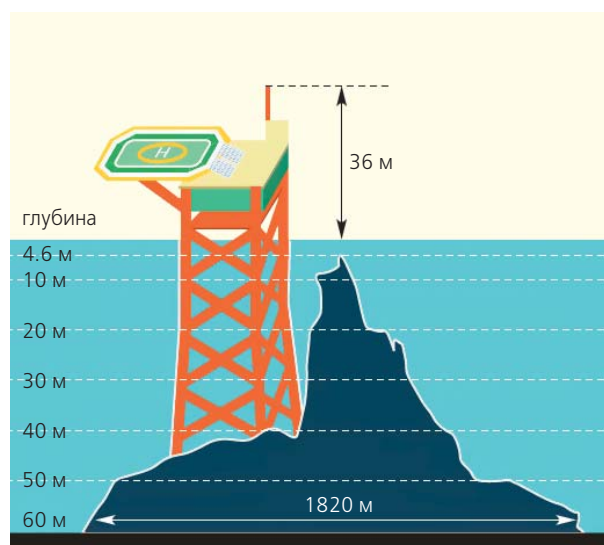


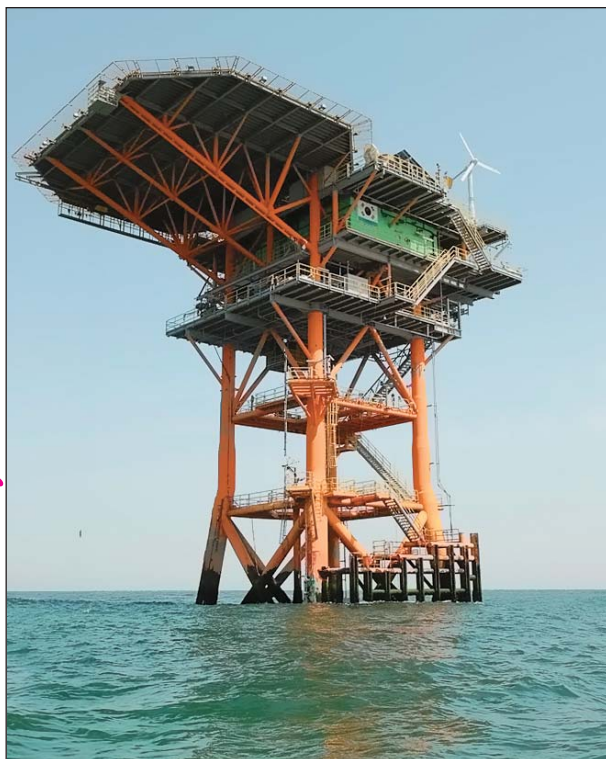
Схема подводной скалы Иодо с возведенной на ней южнокорейской научно-исследовательской станцией.

чение морских течений, в борьбу с загрязнением окружающей среды, помогает предотвращать морские бедствия (ведь известно, что в Восточно-Китайском море часто случаются цунами и подводные землетрясения). Кроме того, скала Иодо расположена на пути 40% тайфунов, направляющихся в сторону Корейского п-ова и способных нанести серьезный материальный ущерб прибрежному району. Установленная на морской платформе метеостанция позволяет отслеживать перемещение циклонов и своевременно информировать соответствующие службы не только Южной Кореи, но и соседних государств. Таким образом, с научной точки зрения строительство научной базы на Иодо вполне оправданно.

Однако еще в процессе возведения платформы китайская сторона неоднократно выражала протест, требуя прекратить строительство. Корейцы на это отвечали отказом, утверждая, что их действия не нарушают Конвенции ООН по морскому праву 1982 г. Действительно, согласно этой Конвенции, прибрежное государство имеет право в целях разведки и разработки природных ресурсов возводить на шельфе различные установки, создавать вокруг них зоны безопасности (до 500 м), сооружать искусственные острова, проводить буровые работы, определять трассы для прокладки кабелей и трубопроводов**. Китай же продолжал считать Иодо частью своей ИЭЗ. Вскоре южнокорейское правительство начало процесс пересмотра статуса скалы Иодо, заявив, что возведение морской платформы и соответствующей инфраструктуры на ней может стать основанием для объявления Иодо *настоящим островом*.

* Территориальное море — это пояс шириной не более 12 морских миль (22,2 км), примыкающий к сухопутной территории (основному сухопутному массиву и островам) и внутренним водам государств и находящийся под суверенитетом прибрежного государства.

** Конвенция ООН по морскому праву (www.conventions.ru/view_base.php?id=1096).



Морская платформа на скале Иодо.

www.panoramio.com

Насколько правомерен этот шаг? В любой энциклопедии можно прочитать, что остров — это участок суши (обычно естественного происхождения) в океане, море или реке, окруженный со всех сторон водой и постоянно возвышающийся над водой даже в период ее наибольшего прилива. Скала Иодо, как известно, всегда находится под водой и под определение острова не подходит. Конечно, с учетом возведенных на ней построек можно с натяжкой назвать Иодо искусственным островом, но настоящим — едва ли.

Тем не менее в правительственных кругах КНР появилось вполне обоснованное опасение, что корейцы, создав *настоящий остров*, теперь будут не только пытаться включить Иодо в свою ИЭЗ, но и претендовать на территориальные воды в центре Восточно-Китайского моря. Надо сказать, что Китай уже сталкивался с подобным прецедентом, когда японское правительство, соорудив в 1700 км к югу от Токио искусственный остров Окинотори, объявило о создании вокруг него 200-мильной ИЭЗ.

В 2006 г. представитель МИД КНР Цзин Ган выступил против инициатив своих восточных соседей, утверждая, что Республика Корея не имеет права осуществлять односторонние действия в районе, где еще не установлены границы ИЭЗ между двумя государствами [1].

В марте 2013 г. южнокорейский президент Ли Мён Бак заявил, что по нормам международного

права Иодо не относится к объектам территориального спора, так как в соответствии с Конвенцией 1982 г. подводная скала не может считаться чьей-либо территорией. В то же время президент добавил, что, когда между его страной и КНР будет установлена точная морская граница, Иодо перейдет под юрисдикцию Республики Корея.

Разумеется, Китай эти планы не поддерживает. До настоящего времени китайцы не установили морских границ еще ни с одним из государств-соседей. Более того, ведя переговоры о такой границе с южнокорейской стороной, китайские власти, ссылаясь на позицию Международного суда ООН, требуют учитывать длину береговой линии и численность населения, проживающего вдоль побережья. Тем самым Китай намекает на то, что более многочисленному населению восточного побережья моря (китайцам) необходима большая площадь морского пространства для ведения хозяйственной деятельности, нежели жителям южных берегов Корейского п-ова [6].

Однако и китайцы здесь едва ли правы. Действительно, Международный суд ООН рекомендует принимать во внимание протяженность и конфигурацию береговой линии, но только в споре о делимитации континентального шельфа, а не морской границы [4]. И если уж делить морское пространство, как говорится, по-честному, то морская граница должна находиться на равном удалении от обоих государств, невзирая на их площадь и численность прибрежного населения.

Между тем в настоящее время Иодо де-факто находится под контролем корейцев: их автоматические станции в постоянном режиме накапливают метеорологическую и другую научную информацию, два раза в неделю в район Иодо прибывают южнокорейские патрульные военные корабли, на морскую платформу регулярно садятся вертолеты. Вблизи Иодо ежедневно появляются самолеты морской авиации, в том числе и типа CN-235. Этот самолет оснащен высокоточным поисковым радиолокатором, тепловым оборудованием, сигнальными ракетами, механизмом для сбрасывания спасательных лодок и может совершать непрерывный полет в течение семи часов*.

На континентальном шельфе к югу от о. Чечжудо, в том числе и в районе Иодо, имеются немалые запасы нефти. Об этом стало известно еще в 1969 г. [7]. Спустя пять лет Республика Корея и Япония заключили соглашение о совместном освоении шельфа южной части Восточно-Китайского моря. В ответ внешнеполитическое ведомство КНР выразило недовольство, считая подписанное соглашение *вторжением в суверенитет Китая*. В начале 1990-х годов китайцы также приступили к активному исследованию шельфа [1].

* Береговая охрана усилила патрулирование в районе скалы Иодо (www.ruskorinfo.ru/data/politics/2844/).

Воды вокруг Иодо — богатый источник рыбы и морепродуктов: сельдь, сардину, камбалу, скумбрию ловят в промышленных масштабах, ведется добыча краба, омаров, сбор трепанга и морских водорослей. Недаром корейцы называют Иодо скалой сокровищ.

Несмотря на активную хозяйственную деятельность Южной Кореи вокруг Иодо, фактически *первичную оккупацию* и контроль прилегающего района, правительство КНР неоднократно заявляло, что не признает прав Кореи на Иодо и окружающие воды. В 2011 г. руководство Государственного океанографического управления КНР сообщило, что у их страны *есть право морского и воздушного патрулирования района скалы Суян*. В результате подводная скала была внесена в список объектов, которые *находятся в пределах китайских границ*. Китай тоже стал посылать в оспариваемый район свои патрульные морские суда, а позже и беспилотные воздушные аппараты *для обзора в научных целях*.

Действия китайских властей вновь вызвали протест со стороны правительства Кореи, а ее президент повторил, что *скала Иодо навсегда останется под контролем Южной Кореи*.

Несколько позже в Сеуле озвучили планы сооружения крупной военно-морской базы на о.Чечжудо. Полагают, что одной из задач, возлагаемых на нее, будет защита интересов Южной Кореи в районе Иодо. Одновременно в рамках развития вооруженных сил предполагается создание специального военно-морского соединения — *эскадры Токто-Иодо*. Она будет защищать национальные интересы Южной Кореи в двух спорных районах.

По оценкам южнокорейских политиков, попытка КНР претендовать на морское пространство, включающее скалу Иодо, имеет и военно-стратегическую значимость. В условиях, когда Китай стремится расширить свое политическое влияние в мире, разграничение ИЭЗ на условиях китайской стороны приведет к увеличению присутствия военно-морского флота этой страны в Восточно-Китайском море. Это может создать угрозу национальной безопасности не только Южной Кореи, но и Японии [5]. Однако пока Китай все-таки предпочитает не рисковать и не затевать в регионе *виртуальную войну на два фронта*, решив сосредоточиться на споре не с Южной Кореей, а с Японией по вопросу архипелага Сенкаку (Дяюйдао), лежащего в 170 км к северо-востоку от о.Тайвань*. Подтверждением этому стало официальное заявление КНР, направленное в Министерство иностранных дел и торговли Республики Ко-

рея. В нем говорится следующее: *Вопрос о принадлежности рифа Суян (Иодо) должен решаться путем разграничения ИЭЗ двух стран. Наша позиция совпадает с мнением правительства Южной Кореи — риф Суян не может быть объектом территориального спора*.

Трудно прогнозировать, как дальше будут развиваться события. С 1996 г. КНР и Республика Корея провели уже более 10 официальных встреч по вопросу разграничения ИЭЗ, но так и не пришли к договоренности: корейцы категорически отказываются вести переговоры о статусе Иодо. Отказ мотивирован тем, что между Республикой Корея и Японией уже заключено и действует соглашение, по которому японцы признают водное пространство в районе Иодо корейским. Японские рыболовные суда обязаны получать (и действительно получают) у южнокорейских властей разрешение на вылов рыбы в этой акватории.

Ситуация вокруг Иодо еще более осложнилась 23 ноября 2013 г., когда правительство КНР в одностороннем порядке, без каких-либо предварительных переговоров с государствами-соседями, объявило о введении своей зоны опознавания (идентификации) противовоздушной обороны в Восточно-Китайском море, якобы с целью обеспечения более эффективного прикрытия своих воздушных границ.

В зону опознавания ПВО вошло и стало фактически подконтрольным Китаю почти все Восточно-Китайское море со спорными островами Сенкаку и скалой Иодо. Одновременно Министерство обороны КНР потребовало, чтобы пролетающие через этот район иностранные воздушные суда заблаговременно сообщали о своих полетных планах и используемых радиочастотах и имели на борту четкие опознавательные знаки. В случае невыполнения этого требования силы и средства китайской ПВО оставляют за собой право применить *исключительные меры оборонительного характера*.

Американцы — стратегические партнеры и союзники Южной Кореи и Японии — китайскую зону ПВО не признали. С осуждающими заявлениями выступили Государственный департамент, Пентагон и Белый дом. Государственный секретарь США Дж.Керри назвал односторонние действия Китая попыткой *изменить статус-кво в Восточно-Китайском море*, что, безусловно, увеличит напряженность в регионе и создаст риски инцидентов. Он призвал КНР не исполнять свою угрозу и не предпринимать каких-либо действий против воздушных судов, не подчинившимся приказам.

Не признали китайскую зону и японцы. Так, премьер-министр Синдзо Абэ, выступая в парламенте, заявил, что на попытки изменить существующий порядок вещей, опираясь на силу, Япония *ответит со всей решимостью защитить свои*

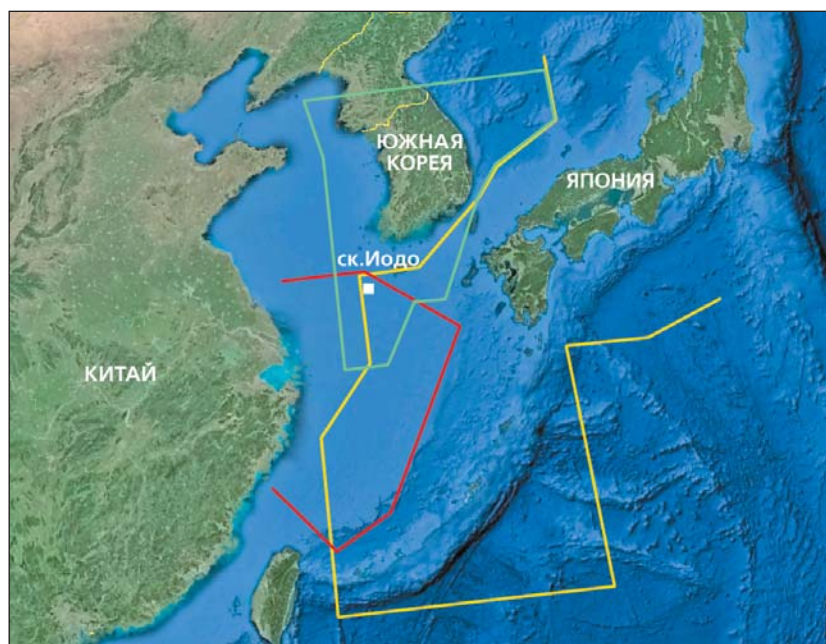
* Как известно, Япония, потерпев поражение во Второй мировой войне, потеряла все территории, приобретенные с конца XIX в. Архипелаг Сенкаку оказался под юрисдикцией США, которые вернули его Японии в начале 1970-х годов. Китай не согласился с этим решением.

территориальные воды и воздушное пространство. Во всяком случае, вскоре в китайской зоне опознавания ПВО появились самолеты сначала Военно-воздушных сил США, в числе которых были стратегические бомбардировщики Б-52, а затем и самолеты сил самообороны и береговой охраны Японии.

Воинственных ответных мер со стороны КНР на это не последовало, но уже на следующий день китайские истребители облетели спорные острова Сенкаку. Похоже, что китайцы, почувствовав в последние годы свою силу и авторитет на международной арене, отступать не собираются. Пресс-атташе Министерства обороны КНР Ян Юйцзюнь, заявил, что *создание Китаем опознавательной зоны ПВО является вполне разумным и законным актом. Япония всегда обвиняла и очерняла другие страны, но никогда не оглядывалась на собственное поведение... Введенная зона не повлияет на обычные полеты международных авиалайнеров... Китай всегда уважал и уважает свободу перелетов, которую гарантирует международное право...*

Кстати, в Пекине пообещали, что в недалекой перспективе будут введены зоны опознавания ПВО и в других районах — над Желтым и Южно-Китайским морями*.

* В этом случае в Желтом море будут затронуты интересы Республики Корея и США, где их авиация и флот регулярно проводят маневры. В Южно-Китайском море ситуация еще сложнее. Здесь ведется территориальный спор об о-вах Спратли, в котором участвуют Китай, Вьетнам, Тайвань, Филиппины и другие страны.



Зоны опознавания ПВО в Восточно-Китайском море. Южнокорейская зона показана зеленым цветом, японская — желтым, китайская — красным.

Корейцы же не только не признали китайскую зону опознавания, но и сильно возмутились, поскольку она перекрыла часть (15×120 км) их зоны ПВО. Южнокорейское правительство (по примеру Японии) дало указание своим гражданским авиакомпаниям не информировать власти Китая о пролете над их зоной. А ведь там ежедневно пролетает более 300 южнокорейских самолетов.

Единственной страной, которая поддержала действия Китая, стала Северная Корея (КНДР).

Подчеркну, что зона идентификации защиты воздушного пространства Южной Кореи (KADIZ) действует с 1950 г. Она была введена представителями ООН и командования Военно-воздушных сил США Тихоокеанского региона. В эту зону, кстати, входят и о-ва Токто, но не входит скала Иодо, которая также с 1950 г. находится в зоне опознавания ПВО Японии. В 1960-х годах Республика Корея попыталась было оспорить такую «нарезку» зон и хотела привлечь к спору в качестве арбитра третью сторону — США. Однако американские власти на это заявили: *Данный вопрос является исключительно двусторонним, входящим в компетенцию Японии и Южной Кореи. Решать его должны эти страны сами на основе общепринятых норм международного права.*

С учетом сложившейся обстановки в начале декабря 2013 г. Сеул объявил о расширении своей зоны опознавания ПВО. В нее вошли южные острова Марато и Хондо, а также скала Иодо (теперь она оказалась в границах трех зон: японской, китайской и южнокорейской). Гражданские и военные самолеты других государств, которые пересекают обозначенное Сеулом про-

странство, должны с того времени сообщать южнокорейским властям планы своих полетов. Военное ведомство Кореи предупредило, что для обеспечения указанного режима будут использованы истребители F-15K, которые поднимутся в воздух в случае появления в новой зоне опознавания ПВО иностранных самолетов-нарушителей. Конечно, с учетом того, что зона опознавания не означает суверенитета, каких-либо активных действий по отношению к нарушителям со стороны ВВС Южной Кореи предприниматься не будет. К тому же южнокорейские патрульные самолеты имеют ограниченный радиус полетов. F-15K, например, могут находиться над Иодо не более 20 мин. В связи с этим Сеул планирует закупку в США самолетов-заправщиков, которые могут про-

длить пребывание истребителей в указанном районе как минимум на час.

Японское правительство спокойно отреагировало на заявление корейцев расширить свою зону опознавания ПВО в Восточно-Китайском море. Так, министр обороны Японии Ицунори Онодэра на пресс-конференции заявил, что *Токио не видит проблемы в принятом решении Сеула*.

В США заявление южнокорейского правительства признали законным, соответствующим международной практике. К тому же, по мнению американцев, *действия Сеула позволят избежать путаницы и угроз гражданским самолетам*.

Таким образом, КНР своим решением о расширении зоны ПВО над Восточно-Китайским морем вызвала ответные действия Республики Корея, которые получили поддержку со стороны США и Японии. Можно предположить, что китайцы, следуя своей давней практике, *бросили в воду пробный камень и теперь наблюдают, как будут расходиться круги от него*.

В заключение попытаемся ответить на вопрос: есть ли перспективы у южнокорейцев перевести состояние *контроля и первичной оккупации* скалы Иодо на следующий уровень — объявить этот искусственный остров своей территорией? Такие перспективы есть. Но они могут реализоваться лишь в случае заключения двустороннего соглашения с КНР о разделении морской границы по срединной (равноотстоящей) линии. Только тогда скала Иодо, с учетом ее особенного географического расположения, может отойти под юрисдикцию Республики Корея. Но стоит учитывать, что уже в период предварительной работы над этим соглашением появится третий заинтересованный игрок — Япония. Токио, как уже отмечалось, по действующему с Сеулом соглашению признает водный район скалы Иодо за Южной Кореей, но только с точки зрения рыболовства.



Патрульный корабль Республики Корея вблизи Иодо.

english.yonhapnews.co.kr

Как только речь пойдет о распространении корейского суверенитета на *остров* Иодо, японцы тут же напомнят всему миру о своих претензиях к о-вам Токто, вследствие чего установление упомянутой морской границы может не состояться. Вопрос останется открытым, и принимать окончательное решение придется следующим поколениям китайцев и корейцев. ■

Литература

1. Иванов А.Ю. Геополитические интересы Республики Корея в Восточно-Китайском море: китайско-южнокорейский спор вокруг континентального шельфа // *Корейский полуостров: накануне перемен. Материалы XVI научной конференции корееведов России и стран СНГ* (г.Москва, 29-30 марта 2012 г.) / Отв. ред. А.З.Жебин. Москва, 2012. С.87–96.
2. Lee Keun Gwan. Toward an equitable resolution of maritime delimitation disputes in East Asia — from historical and critical perspectives // *JSIL International Symposium on Unity in Diversity Asian Perspectives on International Law in the 21 Century*. Nagoya, 2003. P.16–18.
3. Convention on the continental shelf // *United Nations Treaty Series*. 1958. V.499. P.311.
4. Байбекова Л.С. Особенности применения метода срединной линии для делимитации морского пространства между прибрежными государствами // *Вестник Карагандинского университета*. 2012. №4. (68). С.84–88.
5. Ким Ён Гу. Способ решения проблемы острова Иодо в русле морского права. Сеул, 2008.
6. Chui hung-da. China and the Law of the Sea Conference // *Occasional Papers/Reprints Series in Contemporary Asian Studies*. 1981. №4. P.4.
7. Emery K.O., Yoshikasu H., Thomas W.C. et al. Geological structure and some water characteristics of the East China sea and Yellow sea // *CCOP Technical Bulletin*. 1969. V.2. P.3–43.

Жизнь под знаком исследования времени

К 100-летию со дня рождения И.Р.Пригожина

Время и люди

Р.Н.Щербаков,
доктор педагогических наук
Таллин (Эстония)

Мы лишь начинаем понимать уровень
природы, на котором живем...

И.Пригожин

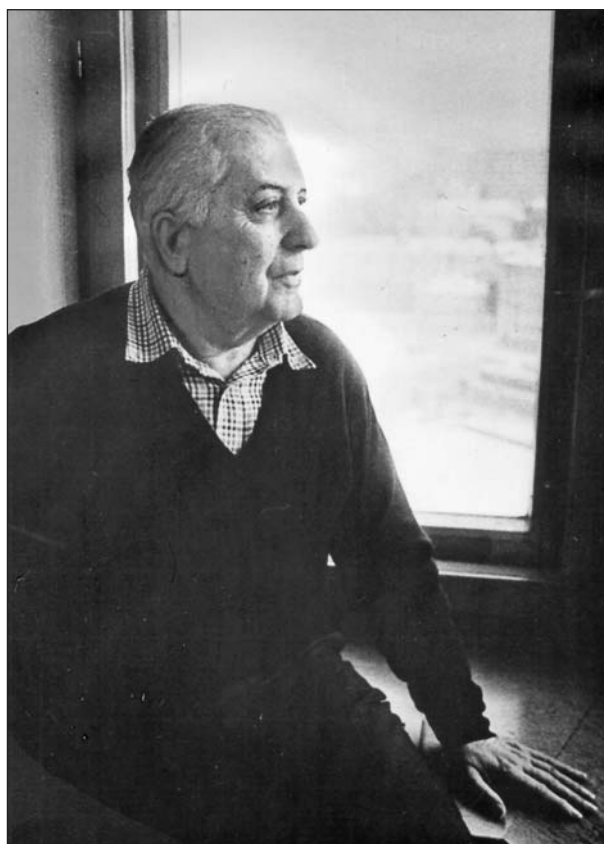
Если век XX был веком теории относительности и квантовой механики, атомной и ядерной физики и космологии, то последняя его треть — временем расцвета исследований открытых неравновесных систем и их роли в эволюции природы. В создание их теории внес свой вклад бельгийский ученый российского происхождения Илья Романович Пригожин, лауреат Нобелевской премии по химии.

Илья Пригожин родился в Москве 25 января 1917 г. в семье фабриканта, по образованию инженера-химика (это скажется позднее на выборе им будущей специальности). В 1922 г. семья вначале эмигрировала в Берлин, но позднее, уже в 1929 г., окончательно поселилась в Брюсселе. Свое школьное образование младший Пригожин, начав в Германии, закончил уже в Бельгии.

Еще в детстве Илья увлекся музыкой (и не расставался с ней всю жизнь), а потом и профессией адвоката. Для понимания ее специфики он обращался к основам психологии, затем к философии и естественным наукам. Но в итоге, подобно отцу и старшему брату, решил получить химическое образование. В 18 лет Пригожин поступил в Свободный университет Брюсселя, где со временем и возникло его главное научное увлечение.

Постигая физику и химию, он был весьма удивлен тем, что в них время считалось лишь иллюзией. Я часто спрашивал своих учителей о смысле времени, но их ответы были противоречивы. Для философов смысл времени был одной из труднейших проблем. Физики находили мой вопрос несколько наивным, поскольку, по их мнению, ответ на него дал еще Ньютон и впоследствии уточнил Эйнштейн [1, с.214].

Трезво оценив недостаточность своих знаний для разгадки тайны времени, Пригожин под влиянием основателей брюссельской школы термодинамики профессоров Т.де Донде и Ж.Тиммерманса



Илья Романович Пригожин.

Фото В.В.Богданова (из архива «Природы»)

займется осмыслением роли необратимости в природе. Вскоре в журнале университета он опубликует статью о попытке объединить философию и естествознание через решение проблемы времени.

По окончании университета Пригожин начал преподавать. Но из-за оккупации Бельгии университет был закрыт, а преподавание запрещено. Занимался им он втайне, что было опасно для него

и всей семьи. Но даже в этот тяжелый для всех период жизни ученый продолжал размышлять о захватившей его воображение проблеме, набрасывая вопросы для отдельных аспектов своего будущего исследования.

Бакалавр естественных наук Илья Пригожин в 1943 г. — за год до освобождения Бельгии от немецкой оккупации — написал диссертацию о значении времени и превращениях в термодинамических системах, за которую два года спустя был удостоен докторской степени. После войны он преподавал в университете, продолжая свои исследования. В 1947 г. Пригожин назначен профессором физической химии.

Обращение к открытым системам природы

Однако в те годы, когда Пригожин занялся приложением идеи необратимости (под углом зрения проблемы времени) применительно к классической термодинамике, физики все еще исследовали главным образом замкнутые системы. Их развитие считалось поступательным, время обратимым, а случайности — погрешностями. При этом эволюция систем физических тел с энтропией, означавшей рождение из порядка беспорядка, должна была бы приводить к тепловой смерти Вселенной, в чем сомневались ведущие ученые. Что же касается биологии, то теория эволюции Дарвина предсказывала совершенствование живой природы. Таким образом, в этом вопросе между физиками и биологами существовало разногласие.

Существовали также отдельные разрозненные факты и выводы из работ Х.Гюйгенса, Г.Л.Ф.фон Гельмгольца, Дж.У.Стретта (лорда Рэля), Ж.А.Пуанкаре и других ученых, которые свидетельствовали о том, что в процессе проведения экспериментов и теоретических разработок зависимость начальных условий от случайностей сказывалась на ожидаемых результатах и потому не укладывалась в рамки строгой классической науки. Решение этих проблем стало возможным с момента, когда физики перестали закрывать глаза на ограниченность и несостоятельность представлений о динамике физического процесса, признав в итоге большинство реальных систем открытыми, сложными, нелинейными, обменивающимися со средой веществом и энергией. К таким ученым относились И.Пригожин, Г.Хакен, М.Эйген и десятки других.

Спустя десятилетия Пригожин вспоминал: *«Мое интеллектуальное развитие происходило под знаком изучения времени. <...> Я пришел к убеждению, что если наука изучает только обратимые явления, то причину следует искать в том, что она исследует упрощенные явления, в которых необратимость не играет сколько-нибудь значительной роли. Мой вывод: необратимость может войти в науку только через изучение сложных явлений»* [2, с.123].



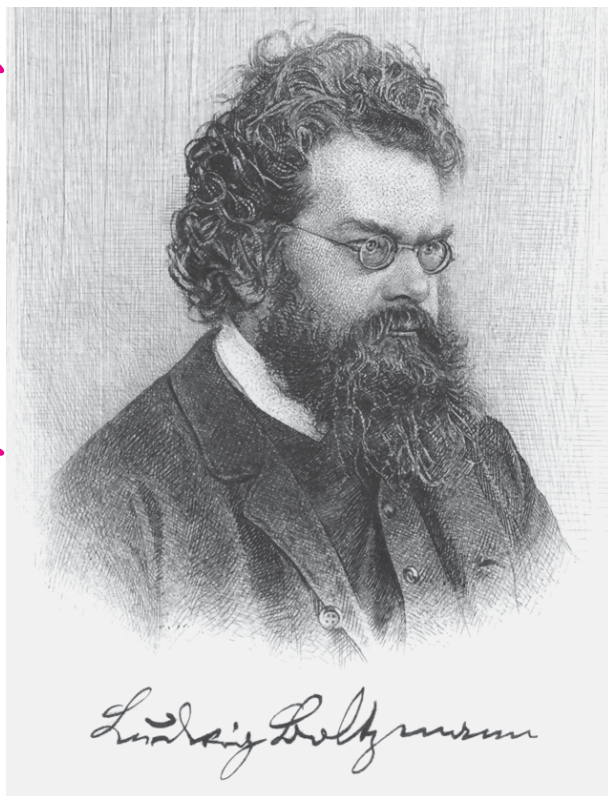
Анри Бергсон, чья философия определила научные идеи Пригожина.

Вдохновение при решении своей проблемы Пригожин черпал из работ философа А.Бергсона и ученых Л.Э.Больцмана, А.С.Эддингтона и Л.Онсагера*. Но при этом оставались сторонники А.Эйнштейна, убежденного в том, что сама «необратимость не существует в фундаментальных законах физики» [3, с.117]. Для Пригожина и его немногих коллег по данной проблеме негласный спор с ними был не менее важным стимулом в обосновании реального наличия в природе стрелы времени.

Впрочем, уже при тщательном анализе термодинамики Дж.У.Гиббса Пригожина ждала немалая удача. Он обратил внимание, что метод Гиббса применим и в неравновесной термодинамике. В определенной мере ученые того времени обязаны Гиббсу не только теорией устойчивости, но и идеей неустойчивости (на нее до тех пор обращали мало внимание), но вскоре она заняла главное место в разрабатываемой теории неравновесных систем.

Именно неравновесной термодинамикой Пригожин и занялся в 1940-х годах и выяснил для себя, что процессы в далеких от равновесия системах переходят во временные и пространственные структуры. По его выводам, как раз неравновесная

* Ларс Онсагер (1903–1976) — американский физикохимик и физик норвежского происхождения, лауреат Нобелевской премии по химии (1968). Основные работы охватывают теорию необратимых процессов, теорию фазовых переходов и теорию электролитов. В 1931 г. открыл принцип симметрии кинетических коэффициентов, послуживший основой для феноменологической термодинамики неравновесных процессов.



Людвиг Больцман, чьи идеи дополнил и развил Пригожин.
Из фондов Дибнеровской библиотеки истории науки
и технологий Смитсоновского института, США



Ларс Онсагер, заложивший основы термодинамики неравновесных процессов.

Из фондов Дибнеровской библиотеки истории науки
и технологий Смитсоновского института

система весьма чувствительна к случайным отклонениям значений величин от их средних значений, что становится фактором, направляющим ее эволюцию. При этом он уделил внимание и тому, как диссипация порождает порядок.

В 1947 г. он ввел понятия производства энтропии и ее потока. Дал локальную формулировку второго начала и предложил принцип локального равновесия. Доказал, что в стационарном состоянии при фиксированных внешних параметрах скорость производства энтропии в термодинамической системе минимальна (теорема Пригожина), а производство энтропии для необратимых процессов в открытой системе стремится к минимуму (критерий Пригожина).

Согласно теореме Пригожина, при данных внешних условиях, препятствующих достижению системой равновесного состояния, неизменному во времени ее состоянию соответствует минимальное производство энтропии. Если же этих препятствий нет, то энтропия достигает нулевого значения. Эта теорема верна, если кинетические коэффициенты в соотношениях Онсагера* постоянны. Время показало, что для реальных систем его теорема справедлива приближенно.

В статистической механике Пригожин проводил исследование уравнения Лиувилля** для ансамбля на основе формальной аналогии своих решений с решениями уравнения Шредингера. Для линейной термодинамики неравновесных процессов ученый доказал теорему о минимуме производства энтропии во всякой открытой системе. Для нелинейной области вместе с П.Гленсдорфом он формулировал также общий критерий эволюции Гленсдорфа—Пригожина.

По существу, это была лишь попытка сформулировать критерий в виде математического правила, суть которого сводилась к тому, что термодинамика при определенных условиях не только не вступает в противоречие с самой теорией эволюции, но, напротив, может прямо предсказать возникновение ее нового состояния. Очевидно, здесь речь шла о расширении класса самоорганизующихся систем, когда явления самоорганизации можно применить и к неживой природе.

* Соотношения Онсагера — это тождества, вытекающие из теоремы Онсагера — утверждения о симметричности матрицы феноменологических коэффициентов, связывающей термодинамические потоки (количественная характеристика необратимых термодинамических явлений) и силы (количественная характеристика причин, вызывающих необратимые термодинамические явления).

** Уравнение Лиувилля описывает эволюцию во времени функции распределения (плотности вероятностей) гамильтоновой системы в $6N$ -мерном фазовом пространстве (N — количество частиц в системе). Согласно теореме Лиувилля — ключевой теореме в статистической и гамильтоновой механике, — функция распределения гамильтоновой системы постоянна вдоль любой траектории в фазовом пространстве.

В 1960-х годах Пригожин с коллегами обратили внимание на наличие неравновесных термодинамических систем, которые, поглощая из внешнего пространства вещество и энергию, могут совершать качественный скачок к своему усложнению. Если исходить лишь из классических законов статистики, то этот скачок не может быть предсказан. Такие системы позже были названы его именем, а их расчет стал возможен благодаря выполненным им работам.

Опираясь на свои выводы, Пригожин отметил, что *в сильно неравновесных условиях может совершаться переход от беспорядка, теплового хаоса, к порядку. Могут возникать новые динамические состояния материи, отражающие взаимодействие данной системы с окружающей средой.* И далее: *Эти новые структуры мы назвали диссипативными структурами, стремясь подчеркнуть конструктивную роль диссипативных процессов в их образовании* [4, с.54].

Тогда же, учтя попытки Больцмана, Гиббса и Эйнштейна применить теорию ансамблей к неравновесным ситуациям и использовав иные свойства, не включаемые в динамическое описание, Пригожин смог удачно обосновать термодинамические соотношения для газов в неравновесном состоянии. Он показал, что макроскопическое выражение для интенсивности источника (соотношение взаимности Онсагера) можно получить из основных уравнений кинетической теории.

Изучая неравновесные процессы в химических средах, Пригожин в 1971 г. опубликовал научную работу по диссипативным структурам «Термодинамическая теория структур, устойчивости и флуктуаций». В ней он разработал упрощенную теоретическую модель (в честь его научной школы американские коллеги позднее дали ей название «брюсселятор») для описания явления самоорганизации, которую можно наблюдать за порогом химической неустойчивости.

Полученные ученым уравнения реакции-диффузии — это та основа математической модели, что предназначена для описания отдельных типов химической неустойчивости и образования временных структур (так называемых химических часов). Очевидный образец такого рода неустойчивости — реакция Белоусова—Жаботинского*, от-



Артур Стэнли Эддингтон, своими мыслями способствовавший развитию идей Пригожина.

Фото компании Transocean, Берлин
(из фондов Дибнеровской библиотеки истории науки и технологий Смитсоновского института)

крытая и изученная в России в начале 1960-х годов, но не встретившая в то время особого интереса со стороны большинства отечественных ученых-химиков и физиков.

По выводам же Пригожина, если подобная система оказывается в состоянии, далеком от равновесия, флуктуации могут дать начало новым пространственно-временным структурам. В физике в целом это означает, что при одних и тех же внешних условиях существует несколько решений уравнения, описывающего нелинейную эволюцию системы. Одно из его решений будет реализовано, что соответствует направлению, по которому и пойдет развитие данной системы.

Поиски целого в познании природы

Уже с юных лет Пригожин, воспитанный на взглядах целого ряда философов и ученых, впитал в себя их взгляды на мир как целостную материальную систему и потому не был удовлетворен методом его расчленения на части. Убеденный с самого начала в целостности мира, он посвятил себя поискам этого целого из составных частей, будь то физика и биология, постоянство и из-

* Борис Павлович Белоусов (1893–1970) — советский военный химик и биофизик. В 1951 г. при исследовании окисления лимонной кислоты броматом в присутствии катализатора (сульфата церия) обнаружил концентрационные колебания ионов церия (одна из первых работ в области нелинейной химической динамики). Анатолий Маркович Жаботинский (1938–2008) — советский и американский биофизик и биохимик. В 1961 г. исследовал механизм данной реакции. В 1980 г. ученые (в составе коллектива из пяти человек) были удостоены Ленинской премии (Белоусов — посмертно), а работа признана научным открытием и занесена в Государственный реестр открытий СССР под №174 (с приоритетом от 27 ноября 1970 г.).

менчивость, необходимость и случайность, хаос и порядок, природа и человек, естественные и гуманитарные науки. Иными словами, Пригожин-химик вел себя как естествоиспытатель, намеренный охватить существо реальности во всех ее проявлениях. И потому от модели сложного поведения в химии и физике он перешел к выводам об изменении научной парадигмы видения мира в целом, к биологии. *Мы начинаем понимать, каким образом, исходя из химии, можно построить сложные структуры, сложные формы, в том числе и такие, которые способны стать предшественниками живого. Впредь физика с полным основанием может описывать структуры как формы адаптации системы к внешним условиям* [4, с.55].

Итак, исследование законов эволюции открытых неравновесных систем в химии, а затем в физике и биологии и самопроизвольной их самоорганизации, несмотря на диссипацию энергии (и даже благодаря ей), привело ученого к разработке и созданию теории диссипативных структур — одного из самых важных направлений междисциплинарного движения в науке XX в., называемого в России (вслед за немецким физиком Г.Хакеном) чаще всего синергетикой.

Таким образом, не только одни замкнутые системы определяют бытие природы. На самом деле *вместо устойчивости и гармонии мы видим повсюду, куда ни обращаем свой взор, эволюционные процессы, приводящие ко все большему разнообразию и все возрастающей сложности. Сдвиг, происшедший в нашем видении физического мира, заставляет нас развивать такие разделы математики и теоретической физики, которые могут представлять интерес для будущего* [5, с.27].

Продолжая исследовать «новый диалог человека с природой», Пригожин организовал специалистов, занимающихся разработкой и применением его идей в химии и физике (в частности, диссипативных процессов в квантовой теории поля), а также в изучении коллективного поведения живых организмов. Работающий с ним коллектив ученых в стенах Брюссельского свободного университета со временем получит мировую известность как Брюссельская научная школа.

Как основатель школы статистической механики и физической химии Пригожин в 1962 г. стал директором Международного института физики и химии имени А.Г.Сольве. Деятельность его вышла за рамки Бельгии. В 1961–1966 гг. он сотрудничал с Национальной ускорительной лабораторией имени Э.Ферми (Институт Ферми в г.Батавия рядом с Чикаго, штат Иллинойс, США), с 1967 г. руководил Центром по изучению сложных квантовых систем при Техасском университете в Остине. В члены Королевской академии наук и искусств Бельгии он был избран в 1953 г., а в 1969 г. стал ее президентом.

Занятия наукой не мешали Пригожину и в его личной жизни. Вначале он вступил в брак с поэтессой Х.Йофе, а позднее с М.Прокопович, инженером по образованию. У него появилось два сына — Ив (1945–1988) и Паскаль (1970 г.р.); последний, впитав в себя увлечения отца археологией, стал специалистом в этой области.

В среде коллег Пригожин известен как энергичный и целеустремленный человек, обходительный в повседневном общении, выдающийся ученый, добившийся крупных — нобелевского масштаба — результатов и при этом сохранивший широкий диапазон интересов к литературе, археологии и музыке, исполнительскому мастерству пианистов.

Стрела времени в существовании мира

Но вернемся к попыткам Пригожина объединить естественные науки и философию на основе разгадки времени, которые были предприняты им под влиянием того же Бергсона. Воспринятые из его работ натурфилософские взгляды оказали влияние не только на чисто научные представления ученого о природе и обществе, но и на его мировоззрение.

Об этом свидетельствуют многочисленные научные статьи, учебные пособия и научно-популярные книги Пригожина. В них добытые им научные факты, теории, выводы, предположения мировоззренческого содержания, причем изложенные вполне доступным языком, приобретают в конечном счете глубокое философское толкование, а также и признание их значимости широким кругом читателей.

Убежденный в том, что *происхождение необратимости коренится в проблеме неустойчивости* [6, с.23], он оперирует двумя видами времени. *Динамическое* позволяет задавать описание движения точки в классической механике или изменения волновой функции в квантовой механике. *Внутреннее* же время — только для неустойчивых динамических систем, оно характеризует состояние системы, связанное с ее энтропией. При эволюции системы симметрия относительно обращения времени утрачивается.

В работе «Переоткрытие времени» (1984) Пригожин отметил, что теперь физика обрела точку опоры не в отрицании времени, а в его открытии во всех областях реальности. В каждой области физики мы находим связанное со становлением материи необратимое время. Именно необратимость отражает сущностные характеристики мира. Выводы из исследований означают, что мы живем в таком мире, где симметрия между прошлым и будущим нарушена.

Таким образом, все работы ученого пронизывает линия развития идеи о необратимости времени. Он строит диаграммы бифуркаций, размышляет

шляет об их каскадах и микроструктурах событий. Все это, по его заключению, делает будущее в принципе непредсказуемым, открытым. По его же выводам, время становится «возникающим» свойством процессов, т.е. временем становления организованных, упорядоченных структур в рассеивающих средах.

Вспоминая о своих многолетних исследованиях проблемы времени, Пригожин позднее подчеркнет, что *парадокс времени, равно как и связанные с ним парадоксы, мы рассматривали как вызов, как проблему, решение которой требует расширения основной концептуальной схемы теоретической физики. Разумеется, мы находимся в самом начале пути* [6, с.23]. Как раз с этим важным методологическим выводом еще долго не соглашались ведущие зарубежные и особенно отечественные ученые-физики.

При этом философски мыслящий ученый предпринимал попытки навести мосты между естественными и гуманитарными науками. От модели сложного поведения в химии он продвигался к глубоким мировоззренческим обобщениям о смене самой научной парадигмы и радикальных изменениях в видении мира в целом. Его эволюционная парадигма охватывает не только физику, химию, но и существенные части биологии и социальных наук. В итоге произошло открытие нового мира необратимости, внутренней случайности и сложности.

В 1960–1970-х годах, развив теорию диссипативных структур, Пригожин описал образование и развитие эмбрионов. Точки раздвоения в его модели соотносятся с теми моментами, в которые биологическая система становится последовательной и устойчивой. При этом он допустил, что его теории и модели систем, зависящие от времени, могут быть применимы к эволюционным и социальным схемам, к характеристикам транспорта и к политике использования природных ресурсов, а также к таким областям, как рост населения, метеорология и астрономия.

По Пригожину, весь мир вместе с нами находится в становлении и развитии. Поэтому мы должны вести диалог с природой, с самими собой и с другими. Лишь тогда наше собственное творчество будет встраиваться в творчество самой природы и взаимодействовать с ней. По существу, мы живем в ту эпоху флуктуаций и бифуркаций, когда действия личности становятся не просто важными, но и решающими. Поэтому конец определенностей в науке и культуре означает начало ответственности человека за судьбы природы и самой цивилизации.

Учитывая сложный характер поведения неравновесных систем, Пригожин подчеркивает, что *вблизи точек бифуркации в системах наблюдаются значительные флуктуации. Такие системы как бы «колеблются» перед выбором одного из нескольких путей эволюции. Даже небольшая флук-*

туация в начальных условиях поведения неравновесных систем может послужить началом эволюции в совершенно новом направлении, которое резко изменит все поведение макроскопической системы [4, с.56].

В 1977 г. Пригожин был удостоен Нобелевской премии по химии «за работы по термодинамике необратимых процессов, особенно за теорию диссипативных структур». По признанию выступавшего от Шведской королевской академии С.М.Классона, *исследования Пригожина коренным образом преобразовали и оживили эту науку. Эта работа открыла для термодинамики новые связи и создала теории, устраняющие разрывы между химическим, биологическим и социальными полями научных исследований* [2, с.30].

В своей Нобелевской лекции Пригожин изложил фундаментальные проблемы, связанные с применением второго закона термодинамики к анализу систем на макро- и микроскопическом уровнях, показал, что неравновесность состояния системы может стать причиной возникновения в ней порядка и что необратимые процессы могут приводить к возникновению нового типа динамических состояний материи, названных им *диссипативными структурами*. Кратко изложив термодинамику диссипативных структур и другие вопросы, он затем заметил, что *уровень развития теории, достигнутый уже сейчас, позволяет выделить различные уровни времени: время, выражаемое понятием классической или квантовой механики, время, связанное с необратимостью процесса через функцию Ляпунова, и время, характеризующее «историю» системы через бифуркации*. В заключение Пригожин подчеркнул: *Я полагаю, что на основе... различных концепций времени можно достичь лучшей интеграции теоретической физики и химии с другими науками о природе, чем это имеет место сегодня* [7, с.206].

Успех теории самоорганизации Пригожина

В 1978 г. в Брюсселе состоялся 17-й Сольвеевский конгресс по проблеме «Хаос и порядок в равновесной и неравновесной механике», в котором Пригожин принял активное участие. Анализ этой проблемы на международном уровне — уровне обсуждений ведущими физиками мира — признание открытий Пригожина и ему подобных.

Последние годы жизни Пригожин посвятил применению теории самоорганизации к квантовому хаосу, отмечая, что *хаос является исходным пунктом физического реализма... Наивысшей наградой для нас служит то, что одна и та же математическая структура, включающая в себя хаос, позволяет решить парадокс времени и квантовый парадокс, т.е. две проблемы, которые омрачали горизонты физики на протя-*

жении большей части этого столетия [6, с.176]. И еще: новый формализм подчеркивает вероятностный характер квантового описания и придает вероятности значение, независимое от измерения. Он ставит на место обратимой эволюции Шредингера эволюцию с разрушенной временной симметрией, что придает точное значение времени жизни вероятностному событию и дает смысл тому факту, что мы будем участвовать вместе с возбужденным атомом в том, что он вернется в свое фундаментальное состояние [8, с.16–17].

Таким образом, разработанная теория хаоса описывает поведение нелинейных динамических систем. Наряду с Пригожиным, в его исследование внесли свой вклад Э.Н.Лоренц, Б.Б.Мандельброт, Г.Хакен, Д.П.Рюэль, В.Эбеллинг, М.Дж.Фейгенбаум и целый ряд советских ученых. Более того, наряду с классическим периодом в развитии физики идут исследования открытых неравновесных систем с их бифуркациями, фракталами, аттракторами и другими специальными свойствами.

Согласно П.А.М.Дираку, «основная трудность теоретической физики — необходимость преодолеть предрассудки». По Пригожину, именно Хаос изменяет формулировку законов физики. Вместо того чтобы выражать определенности, они выражают возможности [2, с.132]. Неравновесная физика дала нам лучшее понимание механизма появления событий. События связаны с бифуркациями. Будущее неопределенно [2, с.182]. Отчасти поэтому синергетика воспринимается в научном обществе осторожно.

Произошло сближение естествознания и с гуманитарными науками. Физика как наука стала исторической не только как система знаний и не только применительно к миру живого и Вселенной. Физики занялись изучением открытых нелинейных систем, далеких от равновесия и имеющих свою историю. В этой ситуации главную роль сыграл тот факт, что физика обрела точку опоры не в отрицании времени, но в его открытии во всех проявлениях природы.

Пригожин отметил: если ему потребовалось более пятнадцати лет, чтобы поверить, что истоки необратимости большинства природных процессов поддаются пониманию [9, с.310], то сегодня на глазах меняется наука, меняются ее служители. Они становятся более чем когда-либо естествоиспытателями. <...> Теперь же начинают изучать природу изнутри, учитывать и наше личное присутствие во Вселенной...» [9, с.315]. Тем самым человек становится органической частью природы.

Итак, физики вплотную занялись исследованием открытых систем, применяя для этого нелинейные дифференциальные уравнения и эксперименты на компьютерах. В итоге новое направление привлекло к себе внимание естественников и гуманитариев со всего мира. В их представле-

нии это учение предстает как картина мира, методология и наука, т.е. как важный элемент современной культуры.

Эволюция систем

По Пригожину, куда ни посмотри, обнаруживается эволюция, разнообразие форм и неустойчивости. <...> Такая картина наблюдается на всех уровнях — в области элементарных частиц, в биологии и в астрофизике с ее расширяющейся Вселенной и образованием черных дыр [4, с.41]. Возникнув в неустойчивом, неравновесном состоянии, она породила стрелу времени в сочетании со случайностью.

По твердому убеждению Пригожина, природа действительно связана с созданием непредсказуемой новизны, где возможное богаче реального. Наша Вселенная следует по пути, включающему в себя последовательности бифуркаций. В то время как другие миры могли избрать другие пути, нам повезло, что наша Вселенная направилась по пути, ведущему к жизни, культуре и искусствам [1, с.221].

В 1989 г. Пригожин вновь подчеркнул, что идея нестабильности позволила включить в естествознание бытие человека, обеспечив возможность понимать его взаимосвязь с природой. Нестабильность, непредсказуемость и время (как важная переменная бытия) стали играть важную роль в преодолении разобщенности, которая всегда существовала между социальными и естественными науками.

В связи с этим примечательно объяснение академиком И.М.Халатниковым причины «утечки мозгов»: после перестройки Россия стала лишь частью мирового сообщества. Оказавшись незамкнутой и, следовательно, неравновесной системой, она породила процессы, предсказать которые было, как правило, невозможно, в том числе и отъезд многих российских ученых за рубеж [10, с.186].

Из своих же работ Пригожин сделал вывод о действии в природе законов трех видов. Если первый вид оперирует траекториями в классической механике и волновыми функциями в квантовой, а второй, как следует из работ Гиббса и Эйнштейна, обусловлен статистической формулировкой законов природы, то наличие хаоса и самоорганизации означает действие еще и третьего вида законов.

Благодаря идеям Пригожина и других исследователей зародилось понимание того, что это учение — одно из направлений науки о становящемся бытии физических, химических и биологических явлений, о самом становлении и его механизме. Оно исследует процессы перехода от хаоса к порядку и обратно в открытых нелинейных средах самой различной природы.

Идеи Пригожина и научное сообщество России

Посетив впервые Россию в 1957 г., Пригожин неоднократно приезжал и позднее. Советским специалистам были интересны его теоретические работы, а Пригожину хотелось знать о достижениях в той же области отечественных ученых: Н.Н.Моисеева, В.И.Арнольда, А.А.Самарского, С.П.Курдюмова, М.В.Волькенштейна, Д.С.Чернавского и других.

В первой половине XX в. свою немалую роль в развитии методов нелинейной динамики сыграли А.М.Ляпунов, Л.И.Мандельштам, А.А.Андронов, А.Н.Колмогоров. Понимание процессов самоорганизации пришло с развитием теорий генерации лазера, колебательных химических реакций, турбулентности, с исследованием неравновесных структур плазмы в термоядерном синтезе и т.д.

В 1971 г. Пригожин выступил с докладом о теоретических выводах, сделанных на основе изучения неравновесных процессов, на знаменитом семинаре П.Л.Капицы, в 1982 г. — на Международной конференции в Таллине, а в 1983 г. — в Пущине. В 1980 г. при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова возник семинар по теории Пригожина. В 1993 г. был создан Институт математических исследований сложных систем МГУ, почетным президентом которого он был избран.

Пригожин писал, что ученым СССР *мы обязаны определением новых классов неустойчивых динамических систем, поведение которых можно охарактеризовать как случайное. Именно для таких систем А.Н.Колмогоров и Я.Г.Синай ввели новое понятие энтропии, и именно такие системы служат ныне моделями при введении необратимости на том же уровне динамического описания* [4, с.7–8].

Испытав на себе пренебрежительное отношение к собственным работам, Пригожин высоко оценивал аналогичные успехи советских ученых. Так, он номинировал на Нобелевскую премию работы Я.Б.Зельдовича и А.Н.Колмогорова, М.В.Волькенштейна и А.М.Жаботинского. Открытие реакции Белоусова—Жаботинского он считал убедительным подтверждением своей теории неравновесной термодинамики.

В целом же Пригожин считал жизненно необходимой поддержку государством советской науки, о чем он напоминал, ког-

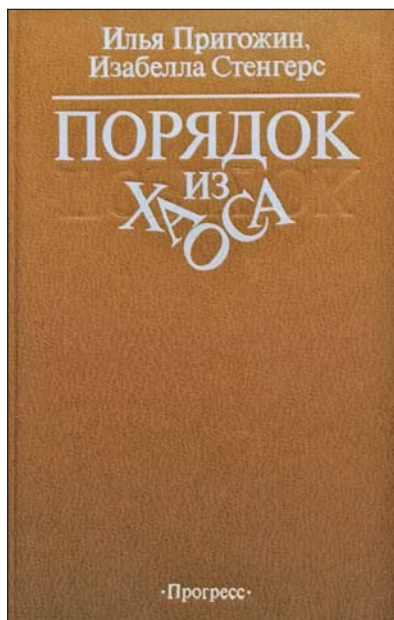
да в нашей стране шла перестройка: *Надо сделать все, чтобы сохранить научный потенциал России, особенно в области фундаментальных наук. Даже в условиях тяжелейшего кризиса недопустимо забывать, что такая поддержка — дальновидное вложение в будущее страны* [2, с.9].

Начиная уже с 1964 г. переводы трудов ученого появляются в СССР. Издание и переиздание монографий, книг и статей (особенно таких, как «От существующего к возникающему» [5], «Порядок из хаоса» [4] и «Время. Хаос. Квант» [6]) оказались полезными естествоиспытателям и привлекли внимание гуманитариев, обновив и углубив общий взгляд на бытие во Вселенной и в итоге повлияв на мировоззрение научного сообщества в целом.

Наиболее важную роль в «новом диалоге человека с природой» сыграла книга «Порядок из хаоса». Ее ценность видится в том, что в ней разъясняется *переоткрытие понятия времени и конструктивная роль, которую необратимые процессы играют в явлениях природы* [4, с.7]. Ее привлекательность — в мастерском популярном изложении, философском анализе фактов и показе их культурной значимости.

Пригожин был членом 70 академий и научных обществ, почетным доктором университетов, удостоен многих премий и медалей. В 1982 г. он избран иностранным членом АН СССР. Российская академия естественных наук (РАЕН) наградила его медалью нобелевского лауреата, академика Петра Леонидовича Капицы — «Автору научного открытия» и серебряной медалью В.И.Вернадского. Он трижды публиковался в самом известном в СССР и России естественнонаучном журнале «Природа»*.

Принимая медаль П.Л.Капицы, Пригожин сказал: *Врученная мне сегодня награда как бы подводит итог многолетних исследований, когда я впервые задумался над ролью, которую играет ход времени. Время стало центральной темой наших исследований на протяжении столь долгого периода, сначала на термодинамическом уровне, а затем на уровне фундаментальных законов динамики***.



«Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой» — одна из самых популярных в России книг И.Пригожина и И.Стенгерс.

* Пригожин И., Стенгерс И. Возвращенное очарование мира // Природа. 1986. №2. С.86–95; Пригожин И.Р. От классического хаоса к квантовому // Природа. 1993. №12. С.13–23; Пригожин И. Постигание реальности. Выступление в Свободном университете Брюсселя // Природа. 1998. №6. С.3–11.

** Пригожин И. Эта медаль — награда нашей школе // Природа 1996. №6. С.134–135.

Идеи Пригожина сегодня

Последователи Пригожина, никоим образом не пренебрегая знаниями и методами физики замкнутых систем, продолжают заниматься открытыми неравновесными системами в физике, химии, биологии, а также в области социальных дисциплин. Атмосфера нашей Земли, турбулентность, процесс горения, плазма и другие проявления повседневной реальности нуждаются в своих специфических методах для исследований неустойчивости и нелинейности, многообразия путей изменения сложных структур, поисков условий их устойчивого развития и моделирования.

Пригожин писал: *Пока научное мировоззрение не укоренится в культуре в целом, наука на пользу человечества останется только возможностью. Это, безусловно, подразумевает как лучшее распространение научной информации в обществе, так и лучшее понимание проблем научным сообществом* [2, с.219].

Вслед за Пригожиным и его последователями сама теория неравновесных процессов возвращает нас к вопросам, как соотносится возможное и реальное, скрытое и реализованное, случайное и необходимое и т.д. Отыскание научных ответов помогает осмысливать бытие в его реальном многообразии и перестраивать культуру общества в согласии с этим многообразием.

Новое мышление помогает решать проблемы общества как открытой системы со случайностями, хаотическими состояниями и самоорганизациями и вариантами развития. Их Пригожин причислял к *философии неустойчивости*. Включение ее в культуру служит формированию ре-

альных знаний о каждом из нас как о составляющей обществу.

Подход, применяемый в науке для неравновесных систем, должен находить отражение в учебных дисциплинах, уравнивая в итоге рациональную и гуманитарную компоненты культуры. Учет хаоса и применение его методов в природе и обществе позволяет знакомить молодежь с закономерностями и случайностями мира.

* * *

Последние годы своей жизни Пригожин тяжело болел. Но и тогда он не переставал работать: подбирал научный материал для двух очередных монографий. Его книга (совместно с Д.Кондепуди) «Современная термодинамика» была в 2002 г. признана в России «лучшим зарубежным учебником». Скончался ученый 28 мая 2003 г. в возрасте 86 лет в брюссельском госпитале «Эразм».

Как позднее заметил Ю.Л.Климонтович, *возникновение теории самоорганизации... как междисциплинарного, объединяющего нового научного направления, ее становление и развитие связано в значительной степени с именем Ильи Пригожина* [11, с.40]; деятельность ученого была бы невозможна без уверенности и спокойствия духа для преодоления встречающихся на пути трудностей [11, с.57].

В творчестве Ильи Романовича Пригожина мы ценим его уникальный талант видеть то важное в понимании законов реального мира, чему до него не уделяли должного внимания, — случайным явлениям, возможности образования из хаоса порядка, многообразию путей развития систем (независимо от того, что это за система — природы, общества или самой личности).■

Литература

1. Пригожин И. Время — всего лишь иллюзия? // Философия, наука, цивилизация. М., 1999. С.214–221.
2. Пригожин И.Р. Определено ли будущее? М.; Ижевск, 2005.
3. Пригожин И. Эйнштейн: триумфы и коллизии // Эйнштейновский сборник. 1978–1979. М., 1983. С.109–123.
4. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. М., 1986.
5. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках. М., 2002.
6. Пригожин И., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант. К решению парадокса времени. М., 2005.
7. Пригожин И. Время, структура и флуктуации // Успехи физических наук. 1980. Т.131. Вып.6. С.185–207.
8. Пригожин И. Переоткрытие времени // Вопросы философии. 1989. №8. С.3–19.
9. Пригожин И. Мы только начинаем понимать природу // Краткий миг торжества. О том, как делаются научные открытия. М., 1989. С.310–315.
10. Халатников И.М. Дау, Кентавр и другие. Top non-secret. М., 2008.
11. Климонтович Ю.Л. Дискуссионные вопросы статистической физики сквозь призму конфронтации ученых и научных школ. М., 2015.

Новости науки

Нанотехнологии и наноматериалы

Экологичный способ получения кремниевых нанонитей

Ученые физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова разработали новую методику синтеза кремниевых нанонитей — вытянутых вдоль одного направления, практически параллельных друг другу наноструктур, похожих на провода или столбы, которые выращивают на кремниевой подложке. Интерес к ним связан с перспективным использованием в микро- и оптоэлектронике, фотонике, фотовольтаике, сенсорике и даже в биомедицине, поскольку кремниевые наноструктуры не только биосовместимы, но и могут полностью растворяться в организме спустя некоторое время. Стандартный метод получения таких материалов — травление поверхности кремния токсичной плавиковой кислотой (HF) в присутствии частиц серебра. Таким способом можно сформировать нити кремния диаметром от 50 до 200 нм и длиной от 100 нм до десятков микрометров. В МГУ в ходе металл-стимулированного травления HF заменили на более экологичный фторид аммония (NH_4F). Результаты этого исследования недавно опубликованы в журнале *Nanoscale Research Letters**.

Ученые использовали двухступенчатый метод химического травления кремниевой пластины, где инициатором процесса выступили металлические наночастицы серебра. На первом этапе эти частицы осадились на поверхность подложки, причем не ровным слоем, а островками. На втором этапе травление происходило в местах, покрытых серебром, при этом не покрытые металлом участки превращались в нанонити. Серебряные наночастицы «проваливались» внутрь кремниевой пластины, и чем дольше длилось травление, тем более длинные нанонити получались. В конце процесса серебро удаляли с помощью азотной кислоты. На всех этапах вместо опасной плавиковой кислоты использовался фторид аммония.

Идея привлечь NH_4F для электрохимического травления кремния родилась более 20 лет назад, но не нашла широкого распространения. Москов-

ские ученые стали первыми, кто применил это неорганическое соединение в синтезе нанонитей, перейдя к «зеленой химии». И, как показали результаты исследования, структурные и оптические свойства полученных образцов оказались фактически идентичными, а по некоторым параметрам даже превосходящими характеристики нанонитей, изготовленных стандартным методом с использованием плавиковой кислоты. В кремниевых структурах, синтезированных в МГУ, наблюдается сильное рассеяние и локализация света в широком диапазоне спектра, вследствие чего образцы обладают чрезвычайно низким полным отражением света (единицы процентов) как в ультрафиолетовой, так и в видимой области спектра. Помимо этого, в таких наноструктурах увеличивается интенсивность межзонной фотолюминесценции кремния (1.12 эВ) и комбинационного рассеяния света по сравнению с исходными подложками кристаллического кремния.

Кремниевые наноструктуры, полученные с помощью «зеленой химии», можно использовать в фотовольтаике для антиотражающего покрытия, которое повышает эффективность солнечных батарей, в сенсорике в качестве чувствительных элементов оптических датчиков, в фотонике и биомедицине, где нанонити могут выступать как люминесцентные метки.

По материалам пресс-службы Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Приборостроение

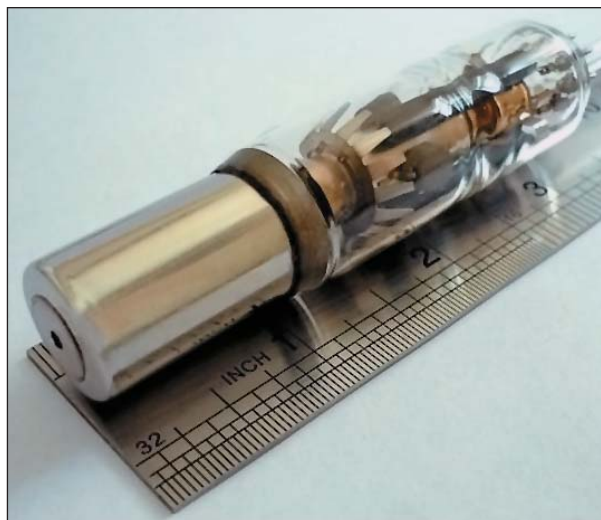
Микрофокусный рентгеновский источник с визуализацией излучения

Методы рентгеновской диагностики широко используют в медицине, физике, химии, материаловедении, а также в системах инспекции и промышленного контроля внутренней структуры и состава различных объектов и материалов. Особенно быстро развивается аналитическое приборостроение на базе компактных источников излучения, что позволяет создавать удобные в эксплуатации настольные и переносные приборы. Однако хорошо известно, что рентгеновское излучение не воспринимается зрением и другими органами чувств человека. Это, во-первых, серьезно осложняет юстировку и настройку рентгеновского оборудования, во-вторых, при работе с настольными и особенно

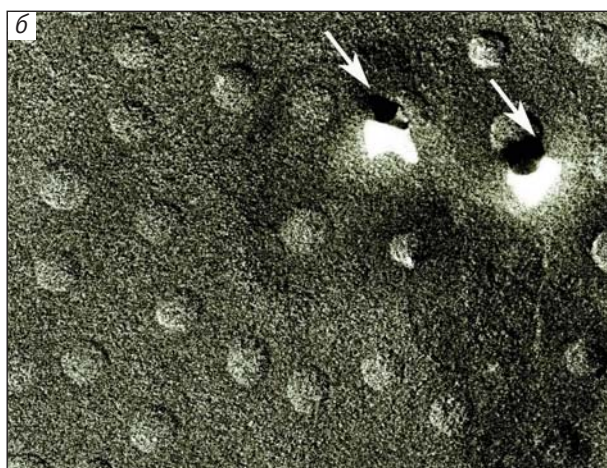
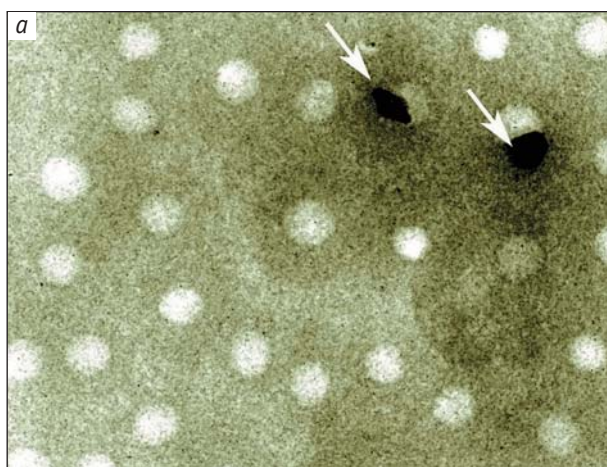
* *Gonchar K, Zubairova A, Schleusener A et al. Optical properties of silicon nanowires fabricated by environment-friendly chemistry // Nanoscale Research Letters. 2016. Doi:10.1186/s11671-016-1568-5.*



Моноблок с рентгеновской трубкой и высоковольтным источником.



Общий вид микрофокусной рентгеновской трубки размером 7.62 см.



Рентгеновские изображения среза кожуры лимона с кристаллами соли (отмечены стрелками), полученные с помощью микрофокусного источника: стандартное (а) и субтрактивное, полученное при цифровом вычитании двух изображений в различных участках рентгеновского спектра (б).

ручными источниками излучения возникает опасность случайного облучения оператора. Эту проблему успешно решили российские ученые и технологи. Разработанный специалистами Физического института имени П.Н.Лебедева РАН в кооперации с ООО «МЭЛЗ» и Научно-производственным предприятием «Исток» имени А.И.Шокина компактный микрофокусный рентгеновский генератор нового поколения объединяет ряд инновационных решений, обеспечивающих рекордные характеристики, надежность и широкую сферу применения. В 2014 г. на это изобретение авторы получили российский патент*. В настоящее время совместно с ТОО «Ангстрем» (г.Караганда) ведется патентование в Европе и США.

Микрофокусный рентгеновский генератор — автономный моноблок, в который вмонтирована миниатюрная рентгеновская трубка диаметром 20 мм и длиной 76 мм. Разумеется, микрофокусные источники рентгеновского излучения изготавливают ведущие компании США, Японии, Германии и широко применяют в различных областях науки, техники и медицины. Но они базируются на габаритных системах магнитной фокусировки. Российские специалисты отказались от таких систем и установили в корпусе трубки уникальную двухступенчатую систему электростатической фокусировки электронов. Это обеспечило возможность получения фокуса размером менее 10 мкм, резко сократило габариты и вес трубки (до 20 г), а также ее энергопотребление.

Другая принципиальная особенность нового рентгеновского прибора заключается в конструкции анодного блока, который выполнен составным: в виде тонкой металлической пленки (полупрозрачной для электронов) и прозрачной в види-

* Патент № 2567848 Российской Федерации от 18 июня 2014 г.

мом диапазоне подложки из синтетического кристалла алмаза, которая люминесцирует в оптическом диапазоне. Оригинальная конструкция анода обеспечивает при попадании на него электронного пучка одновременную генерацию потоков рентгеновского излучения в металлической пленке и оптического — в алмазной подложке. При этом положение и размер оптического и рентгеновского фокусов оказываются практически совмещенными. А поскольку люминесцирующая подложка оптически прозрачна и служит выходным окном рентгеновского источника, это обеспечивает возможность наблюдать и контролировать с помощью средств видеонаблюдения оба вида излучения и их интенсивность. Иными словами, происходит своего рода визуализация рентгеновского пучка, что значительно повышает безопасность работы с источником и облегчает юстировку измерительной схемы. Применение прозрачной алмазной анодной подложки также обеспечивает максимальную яркость рентгеновского фокуса благодаря рекордной теплопроводности алмаза.

Инновационные характеристики источника открывают новые возможности для прецизионных исследований и анализа материалов, в частности в нанотехнологиях. Его высокая яркость может быть использована даже в технологиях глубокой литографии. Особый интерес представляет совмещение микрофокусного генератора с современными системами фокусировки рентгеновского излучения. Это позволяет получать двух- и даже трехмерные карты распределения химических элементов в различных объектах с субмикронным пространственным разрешением. В общем, микрофокусный генератор особенно необходим там, где возникают проблемы локального контроля параметров микроструктуры и состава оптически непрозрачных объектов.

© А.Г.Турьянский,

доктор физико-математических наук
Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН
Москва

Палеонтология

Титанозавры: новые данные о возрастной и индивидуальной изменчивости зубов

Недавно опубликованы две работы, посвященные гигантским динозаврам-завроподам из меловых отложений Центральной Азии. В первой приведены результаты изучения большой выборки зубов титанозавриды из отложений биссектинской свиты (верхний мел, туронский ярус, около 90 млн лет назад) в местонахождении Джаракудук в Узбекистане*.

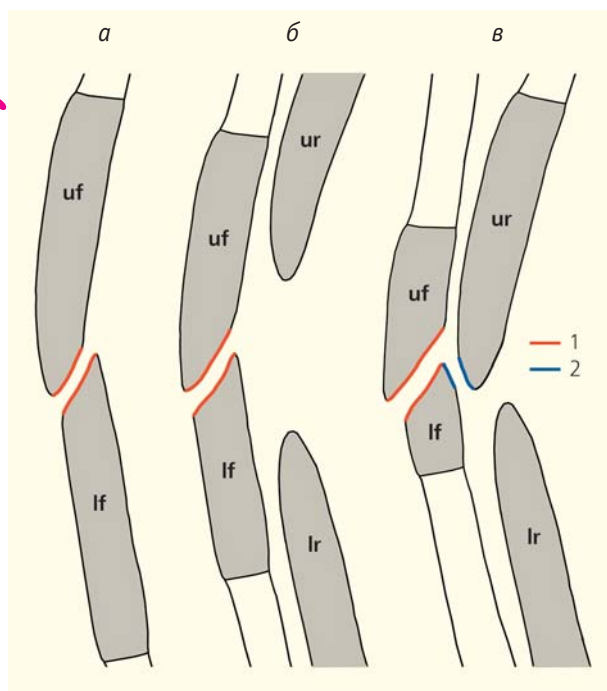
Массовый материал позволил детально проследить возрастную и индивидуальную изменчивость зубов у биссектинского титанозавра.

Одна из уникальных особенностей завропод — морщинистая текстура эмали на зубах, которая проявляется уже у древнейших (раннеюрских) форм и характерна для большинства представителей этой группы. Удивительно, что у некоторых поздне меловых титанозавров эмаль становится совершенно гладкой. Функциональный смысл появления морщинистой эмали и ее исчезновения непонятен. Для биссектинского титанозавра также свойственна существенная редукция морщинистой эмали. Встречены лишь единичные зубы с такой текстурой. Большинство же зубов имеет рисунок «мятой бумаги», либо совершенно гладкую эмаль.

Другая особенность зубов завропод обусловлена развитием на них фасеток стирания во время обработки пищи, что связано с точной окклюзией (контактом) противоположных зубов верхней и нижней челюсти. Эта эволюционная инновация позволила завроподам стать доминантной группой среди растительноядных динозавров в юрском периоде. У других юрских динозавров не было точной окклюзии зубов. Однако ко второй половине мелового периода ситуация изменилась. В двух группах растительноядных динозавров, у гадрозавриды из орнитопод и цератопсиды из рогатых динозавров, развились так называемые зубные батареи, в которых функциональный зуб и несколько замещающих одновременно участвовали в обработке пищи, образуя обширные общие фасетки стирания. Такие зубные батареи позволяли намного эффективнее обрабатывать растительную пищу, поэтому неудивительно, что гадрозавриды и цератопсиды стали доминантами среди растительноядных динозавров позднего мела. Большая часть групп завропод не выдержала конкуренции с новыми динозаврами и вымерла к середине мелового периода. Но одна группа, титанозавры, сумела каким-то образом приспособиться к новым условиям и дала поразительную адаптивную радиацию во второй половине мелового периода (сейчас известно около 50 родов титанозавров). Возможно, одна из причин их удивительного эволюционного успеха — совершенствование зубной системы.

Ранее считалось, что для титанозавриды характерны так называемые апикальные фасетки стирания, т.е. круглые или овальные на вершинах зубов. У более примитивных завропод были латеральные фасетки стирания — узкие полоски по бокам зубов. Изучение выборки зубов биссектинского титанозавра (252 экземпляра) выявило существенно большую вариабельность фасеток стирания. Удалось обнаружить все возможные комбинации 0–2 апикальных и 0–2 латеральных фасеток стирания. Наиболее распространен паттерн (набор) A1L0 (1 апикальная, 0 латеральных

*Averianov A.O., Sues H.-D. Sauropod teeth from the Upper Cretaceous Bissekty Formation of Uzbekistan // Historical Biology. 2016. Doi:10.1080/08912963.2016.1229777.



Схема, поясняющая образование вторичных апикальных фасеток стирания на зубах завропод. Начальная стадия, когда верхний функциональный зуб контактирует с нижним (а). Следующая стадия, когда более половины коронки зуба уже уничтожено стиранием, рост корня прекращен и прорезывается замещающий зуб (б). Финальная стадия, при которой большая часть коронки функциональных зубов стерта и верхний замещающий контактирует с нижним функциональным зубом, образуя вторичные фасетки стирания (в). Обозначения: lf — нижний функциональный зуб; lr — нижний замещающий зуб; uf — верхний функциональный зуб; ur — верхний замещающий зуб; 1 — первичная фасетка стирания; 2 — вторичная фасетка стирания.

фасеток — 62.7%). Следующий по частоте вариант — A2L0 (2 апикальных и 0 латеральных фасеток — 12.3%). Наличие двух апикальных фасеток стирания также отмечалось ранее у других титанозавров и вызывало недоумение исследователей — функциональный зуб может оставить только одну апикальную фасетку на противоположном зубе. Нам удалось объяснить механизм формирования вторичных фасеток стирания (представлен на схеме), которые могли образовываться при контакте функционального зуба с замещающими. Таким образом, у биссектинского титанозавра в результате интенсивной смены зубов образовывалась зачаточная зубная батарея, когда один зуб работал против двух противоположных. Более развитой зубной батареей обладал другой завропод — реббахизаврид *Nigersaurus* из раннего мела Африки*.

* Sereno P.C., Wilson J.A., Witmer L.M. et al. Structural extremes in a Cretaceous dinosaur // PLoS One. 2007. V.2. №11. P.e1230.

Во второй работе представлен обзор находок завропод из мела Центральной Азии, обнаруженных в 24 местонахождениях на территории Казахстана, Узбекистана, Киргизии и Таджикистана**. Во всех местонахождениях остатки завропод очень редки и в большинстве случаев представлены изолированными зубами. Только зубы завропод с узкими коронками известны из мела Центральной Азии. Древнейшая находка — зуб завропода из султанбобинской свиты (ранний мел, аптский ярус) Узбекистана. Других остатков динозавров в этом местонахождении не найдено, что косвенно может свидетельствовать о доминировании завропод среди растительноядных динозавров.

Во всех местонахождениях позднего мела Центральной Азии остатки завропод намного уступают остаткам орнитопод. Наибольшей продуктивностью отличаются местонахождения биссектинской свиты (туронский ярус) в Узбекистане. Только здесь, кроме многочисленных изолированных зубов, о чем говорилось выше, встречаются скелетные остатки, которые могут быть отнесены к титанозаврам, не принадлежащим к кладе *Lithostrotia*. Сходные по строению карандашеподобные зубы из сеноманского—коньякского ярусов меловой системы Центральной Азии могут принадлежать тому же или близкому таксону. Другой представитель завропод с пятиугольными в сечении зубами был найден в яловачской и бостобинской свитах (сантонский ярус) Таджикистана и Казахстана. Бедренная кость из сантонской суксукской свиты Казахстана может принадлежать титанозавру из продвинутой группы *Lithostrotia*. Изменение в строении зубов завропод на границе коньяка и сантона, возможно, связано с появлением титанозавров, характеризующихся иным типом зубов и относящихся к группе *Lithostrotia*, которые вытеснили своих предшественников. Титанозавра из биссектинской свиты можно сопоставить с *Dongyangosaurus sinensis* из сеномана—турона Китая по степени интенсивной пневматизации невральная дуги передних хвостовых позвонков. Он также похож на *Baotianmansaurus benanensis* из сеномана Китая по очень коротким телам первых хвостовых позвонков. Эти три таксона, возможно, относятся к одной, пока не распознанной, эндемичной кладе азиатских титанозавров.

Работы выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 14-14-00015).

© А.О.Аверьянов,

доктор биологических наук
Зоологический институт РАН
Санкт-Петербург

** Averianov A.O., Sues H.-D. Review of Cretaceous sauropod dinosaurs from Central Asia // Cretaceous Research. 2017. V.69. P.184–197.

Археология

Умревинский монетный клад: новые открытия

Умревинский острог (основан в 1703 г.), расположенный на правом берегу р.Оби, в 100 км к северу от Новосибирска, — первый пункт российской государственности на территории Новосибирского Приобья. Археологические исследования памятника, относящегося к периоду раннего освоения русским населением территории Верхнего Приобья, идут с 2002 г. За это время удалось изучить и восстановить деревянные оборонительные сооружения острога (тыновые стены, помост, угловую башню, ворота и приказную избу), а также обширный некрополь конца XVIII — начала XIX в. За пределами острога, на обочине дороги, идущей вдоль Оби, в слое белой золы была найдена емкость из бересты, внутри которой находился клад из 107 серебряных капельных (проволочных) копеек общим весом 28 г. Анализ нумизматических особенностей монет (чеканки, веса и состава металла) показал, что они были изготовлены в конце XVII — начале XVIII в. на разных дворах: на Старом монетном, Кадашевском (известном также как Замоскворечный), Адмиралтейском (Военно-морском) и др.

Датирование ряда монет по наличию буквы «т» в нумизматической легенде позволяет отнести их к периоду соправления Петра и Ивана Алексеевичей или уже ко времени единоличного правления Петра I, т.е. к 1682–1717 гг. В целом Умревинский клад связан с проведением Петром I денежной ре-



Капельная серебряная копейка Петра I.

формы. Значительное количество серебра, находившегося в стране в виде проволочных копеек, представляло для казны большой интерес, так как из него изготавливали рублевые монеты. Однако население, особенно в сельской местности, не спешило расставаться с капельными копейками. Народ считал их надежной «волютой», поэтому в тот период в России были так популярны монетные клады.

Анализ проволочных копеек, проводившийся методом энергодисперсионной спектроскопии, показал, что содержание серебра в составе сплава колеблется от 97.17 до 99.14%, меди — от 0.86 до 2.83%*. При этом удалось установить: капельные

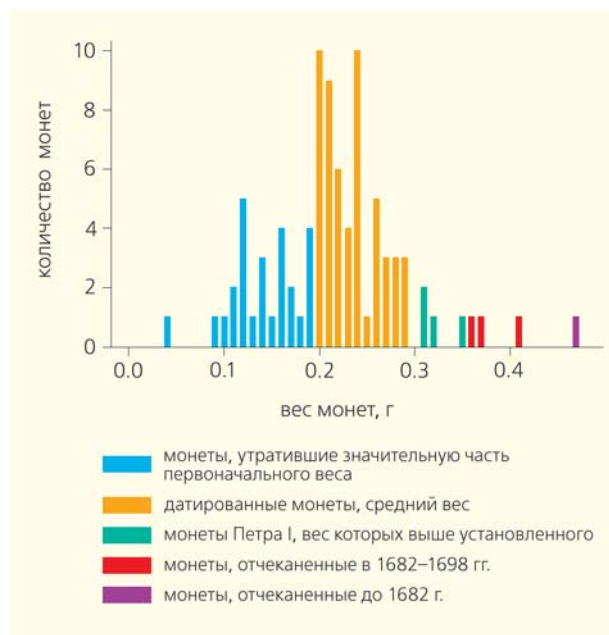
* Бородавский А.П., Горюхов С.В. Умревинский клад монетного серебра // Археология, антропология и этнография Евразии. 2016. Т.44. №2. С.64–70.



Восстановленный Умревинский острог.



Рис.3. Прорисовки серебряных копеек из Умревинского клада.



Систематизация монет Умревинского клада.

копейки с преобладанием в металле меди (1.67–2.83%) были выпущены Старым монетным двором, в то время как в образцах Кадашевского денежного двора ее доля составляла не более 1.63%. Наличие большого количества меди в копейках Старого монетного двора, скорее всего, связано с различными источниками получения серебра для чеканки денег. К таковым в конце XVII — начале XVIII в. относились ранее выпущенные про-

лочные копейки или монеты европейских государств, активно ввозившиеся в Россию до открытия собственных месторождений серебра в Сибири. Состав металла одной капельной копейки из клада сильно отличался от остальных преобладанием олова, что позволило сделать вывод о ее фальшивости.

Еще 10 монет из Умревинского клада с отверстиями для пришивания могли принадлежать аборигенному населению, у которого была мода изготавливать женские нагрудные украшения с русскими серебряными деньгами. Согласно письменным источникам, среди населения Умревинского острога были сибирские татары, которым и могли принадлежать детали этих украшений.

Сумма денег Умревинского клада, по фискальным данным, обобщенным известным сибирским историком О.Н.Вилковым, соответствовала принятому в Сибири годовому оброку с лавки по расценкам XVII в. Кроме того, на эти деньги можно было купить широкий ассортимент товаров, причем в достаточном количестве. Например, в 1640 г. — пять шкурок недолисей красных, 70 — беличьих или три бухарские рубашки, а с 1670 по 1704 г. эта сумма соответствовала одному возу щуки или 10 пудам сухой и пяти пудам свежей щуки, а также шести пудам муки пшеничной и 33 пудам ржи.

С учетом места и условий обнаружения образцов, результатов анализа общей нумизматической коллекции Умревинского острога, а также данных археологического изучения памятника клад, скорее всего, был сформирован не раньше второй половины четвертого десятилетия XVIII в., когда стал развиваться посад. Иными словами, он попал в культурный слой спустя минимум два десятилетия после вывода из обращения проволочных копеек, сохранявших свою ценность только как изделия, содержащие серебро.

В целом серебряные копейки из монетного клада конца XVII — начала XVIII в. — это часть предметного комплекса основателей или первопоселенцев Умревинского острога, которые были связаны с функционированием русской денежной системы на территории Западной Сибири.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-50-00036).

© А.П.Бородовский,

доктор исторических наук

Институт археологии и этнографии СО РАН

Новосибирск

История науки. Генетика

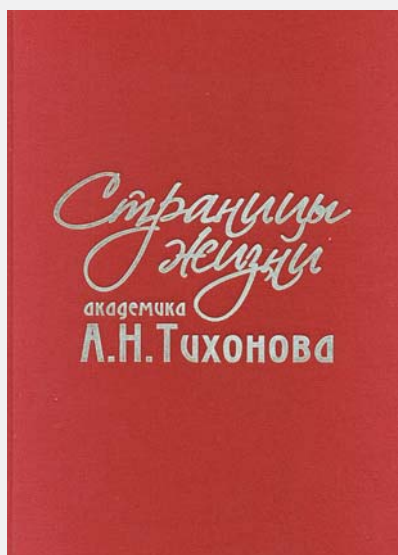
Н.А.Киселев. В ПОИСКАХ ДВОЙНОЙ СПИРАЛИ: ТРОЕ МУЖЧИН И ОДНА ЖЕНЩИНА. Изд.2. М.: Аграф, 2016. 176 с.

Второе, дополненное издание вышло уже после смерти автора — известного ученого Николая Андреевича Киселева, работавшего в области физико-химической биологии. Книга посвящена одному из самых ярких моментов в истории биологии — удостоенному Нобелевской премии открытию в 1950-е годы XX в. двойной спирали ДНК. Его совершили Дж.Уотсон, Ф.Крик и М.Уилкинс. Экспериментальной основой для решающих выводов послужили данные, полученные Р.Франклином. Киселев работал в Кембридже и лично знал многих участников легендарной истории. Он описывает атмосферу, царившую в группе, и психологические отношения между исследователями как свои личные впечатления. Большое предисловие посвящено «русскому следу» в исследованиях наследственности, в частности — матричной гипотезе Н.К.Кольцова. Произведения с таким глубоким анализом человеческой стороны научного процесса фактически до сих пор не было, поэтому оно привлечет внимание не только для историков науки, но и всех, интересующихся основами культуры.



История науки. Математика

Е.А.Григорьев, А.А.Тихонова, Н.А.Тихонов. СТРАНИЦЫ ЖИЗНИ АКАДЕМИКА А.Н.ТИХОНОВА В ДОКУМЕНТАХ, ФОТОГРАФИЯХ И ВОСПОМИНАНИЯХ. М.: МАКС Пресс, 2016. 200 с.



Дважды Герой Социалистического труда, академик Андрей Николаевич Тихонов оставил заметный след в советской науке. В 1948 г. он создал коллектив, который обеспечил математическое моделирование и выполнил все расчеты, связанные с созданием в СССР водородной бомбы. В 1953 г. совместно с М.В.Келдышем создал в Математическом институте имени В.А.Стеклова АН СССР отделение прикладной математики, преобразованное в 1966 г. в Институт прикладной математики АН СССР. После смерти Келдыша именно Тихонов был назначен директором этого института. В 1970 г. им был создан факультет вычислительной математики и кибернетики в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Это позволило впервые в нашей стране на государственном уровне поставить и решить проблему массовой подготовки нового типа специалистов — по вычислительной, компьютерной математике. Благодаря Тихонову был создан нерасторжимый союз теоретической математики (математического моделирования) и практического результата (вычислительно эксперимента). Данная книга, рассказывающая о жизни и творчестве ученого, в значительной степени основана на материалах книг, выпущенных к 100-летию со дня его рождения, но дополнена рядом новых документов, появившихся за последние 10 лет, а также множеством фотодокументов. Издание приурочено к 110-летию со дня рождения Тихонова.

История науки. Физика

БЕСЕДЫ О ЛАНДАУ: ЧЕЛОВЕК ВНЕ СТЕРЕОТИПА / Автор-составитель В.М.Березанская. М.: ЛЕНАНД, 2016. 456 с. (Наука в СССР: Через тернии к звездам. №41).



Книга, составленная Валентиной Михайловной Березанской — историком физики, автором многих научно-исторических работ, предлагает взглянуть по-новому на многие стороны личности и биографии великого ученого, выдающегося физика-теоретика, лауреата Нобелевской премии, соавтора и вдохновителя всемирно известного «Курса теоретической физики». Данное издание не просто очередное повествование о жизни Льва Давидовича Ландау. Задача книги в другом: помочь каждому читателю сформировать собственное представление об ученом по воспоминаниям о нем. Интервью, большинство из которых ранее не публиковалось, передают живые, непосредственные впечатления друзей, коллег и учеников Ландау. И те, кто состоял с ним в близких отношениях, и те, кто встречался с Ландау лишь эпизодически, одинаково эмоционально рассказывают про общение с ученым, о его взглядах на мир, чертах его характера и убеждениях. При этом отзывы о Ландау и даже об одних и тех же эпизодах его биографии нередко противоречивы. Это позволяет лишний раз задуматься о сложности и глубине индивидуальности ученого, но в то же время это интересно характеризует и личности самих рассказчиков.

Предисловием к книге стали проникновенные тексты его ближайших учеников и сотрудников — нобелевского лауреата А.А.Абрикосова и академика И.М.Халатникова. Книга состоит из двух частей. Первая содержит отредактированные расшифровки аудиозаписей бесед, проведенных В.М.Березанской в 2000—2014 гг. с самыми разными людьми: хорошо знавшими Льва Давидовича академиками С.С.Герштейном, Е.Л.Фейнбергом; сдававшими лично Ландау теорминимум В.П.Силиным, В.И.Манько, И.М.Дреминым; с дружившей с Львом Давидовичем и неоднократно проводившей с ним отпуск З.И.Лифшиц (женой Е.М.Лифшица); с Г.В.Киселевым, исследовавшим участие ученого в создании атомной и водородной бомб; с доцентом И.А. Квасниковым и бывшей студенткой физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова Н.С.Рытовой, знавшими Ландау по лекциям на физфаке; с Т.Ф.Близнец — сиделкой Ландау после автокатастрофы. Во второй части книги представлены беседы с окружением Ландау, проведенные в 1962—1974 гг. А.М.Ливановой. Материалы взяты из ее личного архива, который был любезно предоставлен Березанской за год до смерти Ливановой. Только беседа с Ю.Б.Румером (1962 г.) была записана на магнитофон, а затем расшифрована уже после ее смерти. Остальные беседы были записаны Ливановой вручную (иногда очень схематично) и в книге сохранены ее замечания, приведенные в скобках. Завершают книгу приложения: программы теоретического минимума Ландау, любимые стихи ученого, письма разных лет, а также знаменитые «скрижали Ландау». Их можно рассматривать как яркие штрихи в биографии знаменитого ученого.

Каменная береза Камчатки

В.Е.Быкасов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Петропавловск-Камчатский

Издавна на Руси береза воспринимается как олицетворение девичьей прелести, женской красоты и материнской нежности. И это не только наше — чисто русское — ощущение. Еще сотни лет назад один европейский путешественник так выразился о березе в России: *«...И растет там удивительное дерево, с кожей белой и нежной, как у молодой женщины»*. Да и в якутских сказках (олонхо) береза также олицетворяет собой девушку, невесту, женщину.

Тем разительнее на этом фоне выглядит наша камчатская (каменная) береза, с ее мощным (диаметром до 60–70 см и даже более) кряжистым стволом, укрытым «броней» толстой коры. Такое дерево впору сравнивать не с хрупкой девушкой в белой одежде, а с закованным в латы богатырем с мощными «руками». На этот образ работает и то, что стволы-«туловища» взрослых деревьев нередко как бы прикрываются громадным (до полутора и более метров в поперечнике) «щитом» капового нароста.

Да и само название — каменная береза — также способствует восприятию его как образца крепости, стойкости, мужества. Хотя и не совсем ясно, по каким причинам дерево получило свое название. То ли оттого, что его свежесрубленные стволы практически полностью погружаются в воду (тонут, как камень) вследствие высокой плотности древесины. То ли оттого, что оно нередко произрастает на обнаженных каменистых горных склонах [1, с.532]. То ли оттого, что кора взрослых деревьев имеет характерный буро-каменистый цвет [2]. То ли, наконец, по всем этим причинам, вместе взятым.

Что же касается распространения каменной березы, то различные ее разновидности произраста-



Лесной богатырь.

Здесь и далее фото В.Е.Быкасова

ют на огромном пространстве Восточной Сибири и Дальнего Востока: от верховьев рек Тимптона и Алдана на севере до северо-восточных провинций Китая, северной части Корейского п-ова и о.Хоккайдо на юге [3]. А также от бассейнов рек Ангары, Муи и Баргузина на западе до южных отрогов Корякского нагорья и п-ова Камчатки на востоке [4]. А в целом ее ареал приурочен к тем регионам с холодным и влажным океаническим климатом, которые известный советский геоботаник В.Н.Васильев относил к гомарктической области третичных бореальных лесов Дальнего Востока [5].

Если же говорить о Камчатке, то первые небольшие рощи каменной березы появляются на широте около 51°с.ш., чуть севернее мыса Лопатка. Практически сразу же эти рощи соединяются в большие массивы, совокупность которых север-



Хочешь жить — умей вертеться.



Оригиналка.

нее Курильского озера образует условно сплошной древесный покров вдоль подножий и склонов гор. Однако севернее сочленения долин рек Плотникова и Быстрой (53°с.ш.) этот единый покров, в силу орографических и, отсюда, климатических причин, разделяется на два самостоятельных пояса. Первый из них по западным склонам и предгорьям Срединного хребта подходит вплотную к Парапольскому (Рекинникскому) долу, достигая 60°с.ш. А второй по склонам Восточного хребта и восточным предгорьям Срединного хребта доходит до бассейна р.Тымлат, достигая примерно 59°30'с.ш.[6, 7].

Относительно видового статуса каменной березы Г.Стеллер написал: *Она тут настолько отличается от березы европейской, что могла бы считаться как бы особым видом, если бы не было известно, что это различие вызывается климатом и условиями погоды* [8, с.58]. Таким образом, каменная береза Камчатки характеризовалась им всего лишь как одна из разновидностей берез.

Однако после этого статус каменной березы претерпел значительные изменения. В частности, в 1831 г. известный натуралист А.Шамиссо по гербарным сборам, осуществленным А.Эрманом на Камчатке [9, с.5], выделил дальневосточную каменную березу в отдельный вид (*Betula ermanii*). Век спустя Васильев [5] вообще склонялся к тому, чтобы признать видовую самостоятельность уже



Снеголом.

и нашей — камчатской — каменной березы. И это разделение каменных берез на множество самостоятельных форм получило настолько сильный резонанс, что, как указывал камчатский лесовед В.А.Шамшин [6], некоторые ботаники считали возможным выделять у каменной березы до 22 видов и подвидов.

Однако ближе к концу XX в. М.А.Шемберг [9], досконально изучивший каменную березу, пришел к выводу, что она — географически, экологически и, главное, генетически — единый вид. С ним согласились и некоторые другие исследователи [10]. Так что, наверное, правильное будет относить березу Эрмана к группе так называемых ребристых берез (секция *Costatae* рода *Betula*), объединяющей также собственно березу ребристую (произрастает в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке), березу шерстистую (Приморье), березу бархатистую (Шантарские о-ва), березу ложноэрманову (о.Сахалин) и березу ильмостистую (о.Хоккайдо, Япония).

Стоит отметить, что, несмотря на принадлежность растений к одному виду, каменноберезняки Камчатки имеют черты и особенности, отличающие их от зарослей каменной березы в Восточной Сибири и в других регионах Дальнего Востока. К их числу у зрелых лесов, представленных деревьями первой величины (высотой до 15–18 м), относятся однородность и одноярусность зрелого



Зимняя сказка.



И белизна снега, и зелень листвы.

древесного покрова, редкостойность самих древостоев [3] и удивительная кривизна стволов.

Вполне очевидно, что это обусловлено многими причинами. Н.В.Павлов, например, связывал эти свойства с низким плодородием почв, недостатком прямого солнечного света и, отсюда, необходимостью использовать рассеянную радиацию [11]. А П.Н.Чижиков основной причиной искривленности стволов и ветвей считал рыхлость почвообразующих пород: по его мнению, береза Эрмана вынуждена создавать ажурную крону для того, чтобы избежать ветровалов [12]. Впрочем, ажурность кроны можно объяснить и необходимостью улавливать больше солнечного света, которого так не хватает на Камчатке [13]. А чтобы и этого рассеянного света получать достаточно, каменноберезняки в зрелом возрасте приобретают «парковый» вид, т.е. образуют леса с исключительно малой (30–40, а иногда и лишь 10–20%) сомкнутостью крон. Другое дело, что весь этот набор характерных черт каменноберезовые леса приобретают в довольно почтенном возрасте — когда им заведомо больше 150 лет.

А живет каменная береза, надо сказать, довольно долго — от 200 до 350, а возможно, и до 500 и более лет, что само по себе вызывает удивление. Но еще большее удивление вызывает метаморфоза, происходящая с каменной березой в зрелом возрасте. Дело в том, что молодые деревья (подрост) березы Эрмана и густотой древостоя, и формой кроны, и стройностью стволов, а также белизной и нежностью коры достойно соперничают с подмосковными березками. И это не случайно, ибо ко-

ра молодых деревьев содержит в себе большое количество бетулина, который и придает ей белую окраску. Тем разительнее выглядит перемена, происходящая с растением на определенном — примерно в возрасте 150–180 лет — этапе жизни. Сначала береста в процессе склерификации теряет свой первичный белый или кремовый цвет и становится серой, а иногда и бурой [6]. А затем спелые и перестойные деревья окончательно покрываются мощной «броней» из толстой (до 2.5–3 см и более) и как бы «черепитчатой» коры. В целом же все названные морфологические особенности каменной березы, столь наглядно отражающие процесс ее адаптации к суровым природным условиям, лишний раз подтверждают достаточно высокую приспособляемость этого дерева.

Фото А.В.Быкасова

Как лесообразующая порода, каменная береза характеризует-

ся множеством своеобразных и на первый взгляд противоречащих друг другу особенностей. К примеру, она достаточно явно демонстрирует узкую экологическую специализацию, которая прежде всего проявляется в очевидной ее приуроченности к возвышенным и хорошо дренированным местобитаниям [4]. И в то же время, в отличие от материковых регионов Дальнего Востока (там каменная береза вследствие подобной специализации образует узкий верхний пояс горнолесной растительности), на Камчатке она занимает гораздо более широкую высотнo-ландшафтную нишу.

Нижние границы произрастания каменной березы варьируют от 1.0–2.5 м над ур.м. на песчаных насыпях и береговых валах аккумулятивно-приморских равнин юго-восточного побережья полуострова до 30–50 и более метров на поверхности предгорных флювиогляциальных равнин в остальных его районах. Верхние же пределы ее произрастания (на границе соприкосновения с поясом подгольцовых стлаников) колеблются от высот 500–600 м на юге полуострова и 600–800 м в его центральной части до 150–200 м в лесотундровых районах материковой части области. И лишь в долине р.Камчатки береза Эрмана, уступая место на равнинах и предгорьях рощам белой березы и елово-лиственничной тайге, образует довольно узкий (от 150–200 до 300–500 м по вертикали) пояс горнолесной растительности от высот 250–300 до 600–800, а местами (Толбачинский дол) — от 600–800 до 1000–1100 м. По словам академика В.Л.Комарова о каменной березе в этой части Камчатки, *она является здесь определенно*

горным деревом, появляясь на склонах хребтов и сопок выше хвойного леса [14, с.40].

Другое (и не менее характерное) экологическое свойство березы Эрмана — ее терпимость к излишнему увлажнению, отчего каменноберезнякам свойственна постоянно повышенная (на 20% больше, чем в лиственничниках и ельниках) влажность воздуха [3, 4]. По этой же причине каменная береза довольно сносно чувствует себя на береговых валах и кошках (таково местное название морских кос) юго-восточной части полуострова, песчаные почвогрунты которых не содержат излишнего количества влаги, хотя сам по себе воздух этой влагой буквально пересыщен.

Однако на Западно-Камчатской равнине, в полосе приморской низменности (шириной от 3–6 до 15–25 км и более), она растет преимущественно отдельными рощицами и массивами, приуроченными к наиболее дренируемым местам. Это объясняется заметным увеличением здесь числа дней с облачностью и туманами по сравнению с юго-восточным побережьем, понижением по этой причине температуры воздуха и испарения и, как окончательное следствие, резким повышением степени заболоченности ландшафтов и экосистем. В то же время на северо-западном побережье полуострова, где к морю выходят хорошо дренированные горные поднятия, а летние температуры повышаются за счет влияния теплого воздуха азиатского антициклона, массивы каменноберезняков по склонам сопок почти вплотную подступают к морскому берегу.

Подобную же двойственность реакции каменная береза проявляет и по отношению к температурному режиму. Например, без видимых последствий перенося морозы в минус 50–60°, она тем не менее явно избегает селиться в местах, характеризующихся излишним застаиванием и, отсюда, выстигиванием воздуха, а потому обладающих резко контрастными климатическими показателями (это самые низшие части предгорий и поверхности верхних речных террас). Другое дело, что, уступая такие места березе плосколистной (белой, японской), она в процессе скрещивания с последней образует своеобразную гибридную форму («преснец»), которая в несколько большей степени приспособлена и к перувлажнению, и к резкой континентальности климата.

Впрочем, каменная береза боится не столько больших морозов как таковых, сколько глубины и степени промерзания почвогрунтов. Таким образом, она предпочитает селиться либо там, где мерзлоты нет вовсе, ли-

бо там, где деятельный горизонт (слой весенне-летнего протаивания) совпадает с глубиной (0.5–0.7 м) ее корневой системы. Но нельзя исключать и того, что предпочтительность эта вызвана не столько промерзанием почвогрунтов, сколько повышением их увлажненности (за счет создания водоупорного экрана из мерзлых горных пород) и, следовательно, ухудшением условий аэрации в деятельном слое.

Однако и с сильными морозами каменная береза справляется довольно успешно — прежде всего, за счет накопления снега в лесных насаждениях и связанного с этим резкого уменьшения глубины промерзания почвогрунтов. Уже при снежном покрове в 60–70 см, устанавливающемся в каменноберезняках к началу—сердине января (т.е. к самым сильным морозам), дальнейшее промерзание почв под ними прекращается практически полностью [6]. Вот отчего, кстати, каменноберезовые леса занимают последнее место среди всех древесных формаций Камчатки по глубине и степени промерзания почвогрунтов. Исключение составляют разве что пойменные участки, где проявляется отепляющий эффект близко стоящих грунтовых вод.

В то же время формирование в каменноберезняках мощного (до 1.5–2 м и более к концу зимы) снежного покрова приводит к тому, что весеннее оттаивание почвы запаздывает на две-три недели по сравнению с другими биоценозами, так как интенсивное размораживание грунтов приурочивается к поступлению на их поверхность талых вод. Впрочем, это обстоятельство ничуть не мешает каменной березе начинать весеннюю вегетацию еще до начала оттаивания, а появление развернутой листвы — до полного схода снежного покрова.

Наконец, стоит сказать несколько слов о хозяйственной значимости каменной березы. Дело



Трутовик обыкновенный.

в том, что помимо искривленности стволов, на ее товарных качествах очень негативно сказывается сильное повреждение древесины гнилью и грибами. Среди них наиболее распространен трутовик обыкновенный, вызывающий центральную стволовую гниль (дуплистость) — одну из основных причин снижения продуктивности каменноберезовых древостоев и их невысокую товарную ценность [6].

И все же высокие физико-механические свойства древесины обусловили ее широкое использование. К примеру, коренные жители Камчатки (ительмены и коряки) повсеместно применяли каменную березу при строительстве своих полуподземных жилищ, а во времена Второй Камчатской экспедиции из древесины каменной березы было построено превосходное по своим мореходным качествам морское судно «Большереец» [15]. Да и в наше время плотная и очень живописная по структуре и текстуре древесина березы Эрмана

служит прекрасным материалом для изготовления мебели, нарт, посуды, рукояток для разного рода инструментов и прочих поделок. Причем наибольшую ценность в этой области применения представляет древесина наростов-капов, которая по всем своим параметрам и характеристикам не уступает древесине знаменитой карельской березы. Это было отмечено еще Стеллером, написавшим: *«...Эти наросты отличаются большою твердостью и огнестойкостью и идут на выделку различной столовой посуды»* [8, с.58–59].

Но все же деловой ресурс каменноберезняков не идет ни в какое сравнение с их ролью в сохранении ландшафтно-экологической структуры полуострова в естественном состоянии. Дело в том, что типичные «парковые» каменноберезняки с деревьями первой (не менее 15–18 м) и второй (не более 10–12 м) величины произрастают на достаточно мощных (от 0.5 до 1.5–2 м) супесчано-суглинистых делювиально-шлейфовых отложениях, сплошным плащом покрывающих средние и нижние участки горных склонов, а также на почти столь же мощных супесях и суглинках флювиогляциальных предгорий и верхних речных террас [15]. Как древостои, они характеризуются очень мощным и рыхлым дерново-гумусным горизонтом, а также прекрасно развитой (до 10 см мощностью) лесной подстилкой («лесным войлоком»), которую образуют отмершие части высокотравья. А поскольку масса этой подстилки в сухом состоянии достигает 2–3 т/га [17], каменноберезняки поглощают и переводят в подземный сток от 60 до 90% из всех тех (от 600–800 до 1500–2500 мм/год) осадков, которые выпадают на склонах гор и вулканов полуострова. Тем самым они оказываются одним из трех ведущих факторов (наряду со стланиковыми зарослями и рыхлыми вулканогенными горными породами) формирования стабильного по гидрогеохимическим и термическим параметрам и характеристикам подземного стока Камчатки.

Ну а дальше все просто. Насыщенность почвогрунтов водой и высокая стабильность подземного стока приводят как к высокой зарегулированности стокового и термического режима камчатских рек, так и к чистоте самой воды — за счет резкого уменьшения размыва грунтов. Это способствует исключительной продуктивности лососевых — от 240 (в среднем) до 6000–8000 и даже до 15 200 кг/км² площади речного бассейна. Для сравнения: в бассейнах таких рыбных рек, как Обь или Амур, средняя продуктивность рыбных ресурсов составляет всего лишь 17–22 кг/км².

В свою очередь, этот, казалось бы, сугубо экологический, аспект каменноберезовых лесов оборачивается высочайшим экономическим эффектом. Еще недавно лосось, составляя всего 5–7% от годового уровня добычи рыбы и морепродуктов Камчатки, обеспечивал области выпуск 33–35% (в денежном выражении) всей ее товарной продукции. Кстати, это в 2–2.5 раза превышало стоимость то-



Каповый «щит».

варной продукции, произведенной всеми нерыбными отраслями, вместе взятыми. Да и в наши дни экономическая значимость лосося оказывается не намного меньшей.

В этом и заключается, пожалуй, наиболее замечательный из всех феноменов березы Эрмана. Потому камменноберезовые леса полуострова с полным на то основанием можно считать столь же бесценным общечеловеческим достоянием, как и тропические дождевые леса (гилеи) Амазонии. Ибо они находятся в самом начале той экологической цепочки, заключительное звено которой — самое крупное в Азии стадо диких лососей Камчатки. И без сохранения камменноберезняков генофонд тихоокеанских лососей, который под воздействием искусственно воспроизводимой рыбы и без того приобретает все более и более явные черты деградации, может быть потерян навсегда.

Так что единственным, пожалуй, способом уберечься от такой — более чем возможной — ка-



Картограмма Камчатского гидроэкорегiona.

тастрофы было бы придание Камчатскому гидроэкорегionу, обособляемому в пределах 200-мильной морской зоны экономических интересов России [18, 19], статуса мирового управляемого резервата дикой природы с одновременным внесением его в Список объектов Всемирного природного наследия ЮНЕСКО. ■

Литература

1. Миддендорф А.Ф. Путешествие на север и восток Сибири. Ч.I. Северо-Восток Сибири в естественно-историческом отношении. СПб., 2004.
2. Голева Г.А. Гейзеры и горячие озера Кроноцкого заповедника: Путеводитель. М., 1993.
3. Елагин И.Н. Эколого-фенологическая характеристика камменноберезовых лесов Центральной Камчатки // Леса Камчатки и их лесохозяйственное значение. М., 1963. С.229–258.
4. Турков В.Г., Шамшин В.А. Лесоводственно-таксационная характеристика камменноберезовых древостоев Камчатки // Леса Камчатки и их лесохозяйственное значение. М., 1963. С.259–296.
5. Васильев В.Н. К систематике и географии дальневосточных берез // Ботанический журнал. 1942. №1–2. С.3–19.
6. Шамшин В.А. Камменноберезовые леса Камчатки: биология, экология, строение древостоев. М., 1999.
7. Павлов Н.В., Чижиков П.Н. Природные условия и проблемы земледелия на юге Большерецкого района Камчатки. М.; Л., 1937.
8. Стеллер Г.В. Описание земли Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 1999.
9. Шемберг М.А. Береза каменная. Новосибирск, 1986.
10. Гроздова Н.Б. Занимательная дендрология. М., 1991.
11. Павлов Н.В. Березовые леса западного побережья Камчатки // Бюл. Моск. об-ва испыт. природы. Отд. биол. 1936. Т.45. №2. С.129–138.
12. Чижиков П.Н. О березовых лесах юга Камчатки // Бюл. Моск. об-ва испыт. природы. Отд. биол. Новая серия. 1951. Т.56. Вып.4. С.73–79.
13. Стариков Г.Ф., Дьяконов П.Н. Леса полуострова Камчатки. Хабаровск, 1954.
14. Комаров В.Л. Флора полуострова Камчатки. Т.II. Л., 1927.
15. Крашенинников С.П. Описание земли Камчатки. Т.I. СПб.; Петропавловск-Камчатский, 1994.
16. Тюлина Л.Н. Растительность западного побережья Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2001 (Тр. Камчатского института экологии и природопользования ДВО РАН. Вып.2).
17. Ливеровский Ю.А. Почвы равнин Камчатского полуострова. М., 1959.
18. Быкасов В.Е. Каменная береза. М., 2012.
19. Быкасов В.Е., Чуян Г.Н. Камчатский гидроэкорегion как информационное пространство // Материалы Международной конференции «ГИС для устойчивого развития». Петропавловск-Камчатский, 2001. С.170–177.

Информация для авторов

Журнал «Природа» публикует работы по всем разделам естествознания: результаты оригинальных экспериментальных исследований; проблемные и обзорные статьи; научные сообщения и краткие рефераты наиболее примечательных статей из научных журналов мира; рецензии; персоналии; материалы и документы по истории естественных наук. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Статьи рецензируются и проходят редакционную подготовку.

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

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

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

ПРИРОДА

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Научные редакторы
М.Б.БУРЗИН

Т.С.КЛЮВИТКИНА

К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА

М.Е.ХАЛИЗЕВА

О.И.ШУТОВА

А.О.ЯКИМЕНКО

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод
А.О.ЯКИМЕНКО

Графика, верстка:
С.В.УСКОВ

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Президиум Российской академии наук

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

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

Подписано в печать 24.01.2017
Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная. Офсетная печать
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2
Тираж 269 экз.
Заказ 1099
Цена свободная

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

www.ras.ru/publishing/nature.aspx

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.

в следующем номере



В создании целостной картины развития человечества участвуют две тесно переплетенные между собой дисциплины — история и археология. Проблема их взаимосвязи наметилась уже давно, а сегодня стоит особенно остро. История опирается на единственный и важнейший для нее вид источников — письменные документы. Поэтому из всего антропогена общей протяженностью около 2.6 млн лет она способна осветить лишь самый финал. На долю же археологии приходится более 99% времени существования человека, начиная от первых *Homo habilis* и *Homo ergaster* вплоть до появления социумов с достаточно развитой письменностью. Между этими дисциплинами есть еще одно кардинальное различие — методологическое. Особенно резко оно проявилось после обогащения арсенала археологии множеством методов естественных наук — физики, химии, биологии, геологии и др. Становится очевидным, что на современном этапе развития науки требуется принципиально новое осмысление непростых взаимоотношений истории с археологией. Ведь хронологическо-методологический диссонанс между ними нарастает буквально на глазах.

Черных Е.Н. АРХЕОЛОГИЯ И ИСТОРИЯ:
ХРОНОЛОГО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ДИССОНАНС РОДСТВЕННЫХ НАУК

