

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

10 16



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

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

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

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Заросшие гривастым ячменем пастбища в окрестностях пос. Абый, где 20–30 лет назад обитала живородящая ящерица. См. в номере: **Берман Д.И., Булахова Н.А., Алфимов А.В., Мещерякова Е.Н.** *Живородящая ящерица зимой в Сибири.*

Фото Д.И.Бермана

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Гора Опук на черноморском побережье Керченского п-ова хранит следы сильных землетрясений прошлого. См. в номере: **Корженков А.М., Овсюченко А.Н., Ларьков А.С.** *Сейсмические деформации в древнем городе Илурате.*

Фото А.Н.Овсюченко



«Наука»

© Российская академия наук, журнал «Природа», 2016
ФГУП «Издательство «Наука», 2016
© Составление. Редколлегия журнала «Природа», 2016

В НОМЕРЕ:**3 Киселев А.А., Кароль И.Л.****Как поживаешь,
антарктическая озоновая дыра?**

Согласно условиям Монреальского протокола, развитые экономические державы должны были сократить выброс в атмосферу пяти фреонов первого поколения с 1 января 1996 г. Прошло 20 лет. Как же изменилось за это время состояние озоновой дыры над Антарктидой?

9 Ежова О.В., Малахов В.В.**Как возникли жаберные щели?**

Метамерные жаберные щели, соединяющие энтодермальный кишечник с внешней средой, — важнейший унаследованный от общего предка признак (синопоморфия) вторичноротых животных. Жаберные щели не могли возникнуть из ниоткуда. Их происхождение напрямую связано с метамерными выделительными органами и кишечными карманами.

**16 Берман Д.И., Булахова Н.А.,
Алфимов А.В., Мещерякова Е.Н.****Живородящая ящерица
зимой в Сибири**

Эта мелкая (редко превышающая 5 г) ящерица — единственный представитель класса рептилий, проникающий в область сплошного распространения вечной мерзлоты почти до 71°с.ш., т.е. в регионы с люто холодной зимой. Где, при каких температурах и в каком состоянии зимует живородящая ящерица в Сибири?

**30 Корженков А.М., Овсяченко А.Н.,
Ларьков А.С.****Сейсмические деформации
в древнем городе Илурате**

За последние 250 лет Керченский п-ов не подвергался сильным землетрясениям. Однако он хранит немало свидетельств сейсмических катастроф далекого прошлого, которые запечатлены в руинах древних городов.

39 Гельфанд М.С.**Молекулярная эволюция:
как киты уходили под воду**

Гипотеза о родстве китов и копытных была предложена больше ста лет назад, а сегодня уже доказано, что ближайшие родственники китов из современных животных — гиппопотамы. Какие данные об этом свидетельствуют и как события, происходившие на молекулярном уровне, соотносились с макроскопическими изменениями в анатомии и физиологии китов?

51 Стрелков П.П., Лайус Д.Л., Вайнола Р.О.**В погоне за гибридной сельдью**

Капитан Врунгель когда-то установил, что каждая сельдька — рыба, но не каждая рыба — сельдька. Теперь выяснилось, что у каждой атлантической сельди есть гены атлантической сельди, но не каждая сельдь с такими генами — атлантическая. В Северной Европе это может быть результатом гибридизации с тихоокеанской. А в Северной Норвегии, например, живут совсем странные сельди — вроде уже и не тихоокеанские, но еще далеко не атлантические.

Вести из экспедиций**60 Мурзин Ю.А.****Подземные льды
в бассейне реки Кимпиче****Времена и люди****68 АВТОР «КУРСА ФИЗИКИ»
ДЛЯ НОБЕЛЕВСКИХ ЛАУРЕАТОВ****Буссемер П., Ржевский В.В.****К истории учебника физики
О.Д.Хвольсона (69)****Хвольсон О.Д.****Гегель, Геккель, Коссут
и Двенадцатая заповедь
Критический этюд (77)****86****Новости науки**

Волоконный лазер на основе висмутового световода (86). Рельеф поверхности Венеры проступает сквозь толщу облаков. Хатунцев И.В., Федорова А.А., Пацаева М.В., Тюрин А.В. (87). Новые идеи в геохимии недр и атмосферы Земли. Бялко А.В. (88). Первые находки четвертичных насекомых на юге Западной Сибири. Легалов А.А., Дудко Р.Ю. (90).

92**Новые книги****В конце номера****93 Иванов-Омский В.И.****Какой водой лучше утолять жажду?**

CONTENTS:**3 Kiselev A.A., Karol I.L.****How Do You Do,
Antarctic Ozone Hole?**

Under the terms of the Montreal Protocol, developed countries had to reduce the release into atmosphere of five first-generation freons since January 1, 1996. Twenty years have passed. So how has the ozone hole above Antarctica changed?

9 Ezhova O.V., Malakhov V.V.**How Did Gill Slits Emerge?**

The metameric gill slits are one of the most important synapomorphy (character inherited from a common ancestor) of deuterostomes. They connect the entodermal gut with the environment. Gill slits could not appear from nowhere. Their origin is closely related with the metameric excretory organs and gut pockets.

**16 Berman D.I., Bulakhova N.A.,
Alfimov A.V., Meshcheryakova E.N.****Viviparous Lizard in Winter in Siberia**

This small (usually lighter than 5 g) lizard, *Zootoca vivipara*, is the only reptile widely distributed in the permafrost areas reaching almost 71°N, i.e. the regions with the severe winters. Where, at what temperatures and in what condition does viviparous lizard overwinter in Siberia?

**30 Korjenkov A.M., Ovsyuchenko A.N.,
Larkov A.S.****Seismic Deformations
in Ancient City of Ilurat**

Over the last 250 years, Kerch Peninsula was not exposed to powerful earthquakes. But it keeps a lot of evidence about seismic catastrophes of the distant past, which are captured in tatters of ancient cities.

39 Gelfand M.S.**Molecular Evolution: How Did
Cetaceans Become Fully Aquatic**

Hypothesis that whales are kindred to ungulates was suggested more than a hundred years ago. Today it's already proven that the closest living relative to the whale is hippopotamus. What are the data confirming this theory and how did molecular events relate to macroscopic changes in anatomy and physiology of whales?

51 Strelkov P.P., Lajus D.L., Väinölä R.O.**Chasing after Hybrid Herring**

It turned out that all Atlantic herrings have the genes of Atlantic herring, but not all herrings with these genes are Atlantic. In North Europe it can result from hybridization with Pacific herring. Well, quite strange herrings found in North Norway are not Pacific ones yet, but still far from Atlantic.

Notes from Expeditions**60 Murzin Yu.A.****Subsurface Ice
in the Kimpiche River Basin****Times and People****68 THE AUTHOR OF THE «PHYSICS COURSE»
FOR NOBEL LAUREATES****Bussemer P., Rzhetskij V.V.****About the History of O.D.Chwolson's
Physics Book (69)****Chwolson O.D.****Hegel, Haeckel, Kossuth
and the Twelfth Commandment
Critical Essay (77)****86****Science News**

Bismuth-Doped Fiber Laser (86). Surface Topography of Venus Reveals through Dense Clouds. Khatuntsev I.V., Fedorova A.A., Patsaeva M.V., Turin A.V. (87). New Ideas in Geochemistry of Earth's Subsurface Resources and Atmosphere. Byalko A.V. (88). First Findings of Quaternary Insects in the South Part of West Siberia. Legalov A.A., Dudko R.Yu. (90).

92**New Books****End of the Issue****93 Ivanov-Omsky V.I.****What Kind of Water Is the Best
for Thirst Quenching?**

Как поживаешь, антарктическая озоновая дыра?

А.А.Киселев, И.Л.Кароль

О существовании озоновой дыры люди узнали 30 лет назад, в 1985 г. Впрочем, для многих это открытие осталось почти незамеченным; интерес и беспокойство пришли позже, когда своей «дырой», помимо далекой от нас Антарктиды, обзавелась и Арктика. Специалисты сразу оценили потенциальную угрозу и начали интенсивно изучать доселе невиданный природный феномен. Вскоре было установлено, что появление озоновой дыры в конце зимы и начале весны над Антарктикой вызвано совокупным действием трех факторов: блокированием воздухообмена между полярными и средними южными широтами (явление циркумполярного вихря), а также разрушением озона, которое происходит двумя путями — на поверхности кристаллов облаков, возникающих в нижней стратосфере при особо низких (порядка -85° ... -75°C) температурах, и в химических реакциях с участием атомов хлора и брома. Содержание хлорных и бромных соединений в атмосфере в ту пору стремительно нарастало в результате повсеместного использования фреонов в качестве хладагентов, распылителей, пенообразователей, растворителей и т.п. Будучи нетоксичными, непожароопасными и химически пассивными, эти рукотворные химикаты, попадая в атмосферу, благополучно достигали стратосферы, где



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



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

Ключевые слова: озоновая дыра, Антарктида, Монреальский протокол, фреоны.
Key words: ozone hole, Antarctica, Montreal Protocol, freons.

разрушались под действием солнечного света, при этом щедро обогащая ее теми самыми атомами хлора и брома [1]. Таким образом, возникновение озоновой дыры вызвано как естественными, так и антропогенными причинами. В этой ситуации резонно было направить усилия на нейтрализацию результатов «деяний рук человеческих». Уже в 1987 г. был принят и вскоре введен в действие Монреальский протокол, нацеленный на постепенное сокращение, а в дальнейшем и прекращение выпуска и применения озоноразрушающих веществ. Одним из его пунктов стал запрет использования развитыми экономическими державами пяти фреонов первого поколения — фреонов-11 (CFCl_3), -12 (CF_2Cl_2), -113 ($\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$), -114 ($\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$), -115 ($\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$) с 1 января 1996 г.

Прошло 20 лет. Согласно проведенным модельным расчетам, наибольший эффект от принятых монреальских ограничений ожидает-

ся в полярных областях Земли, а срок восстановления озонового слоя — середина XXI в.* Конечно, до 2050 г. еще есть время, но любопытно посмотреть, что происходит с антарктической озоновой дырой сегодня, ведь 20 лет — это тоже немало.

Фреоны 20 лет спустя

В логической цепочке «причина—следствие», на наш взгляд, все же целесообразнее начать с причины. Итак, фреоны первого поколения. Два десятилетия назад их поток в атмосферу не иссяк в одночасье (ведь на большинство стран табу на их производство и использование не распространялось), но значительно сократился. Благодаря

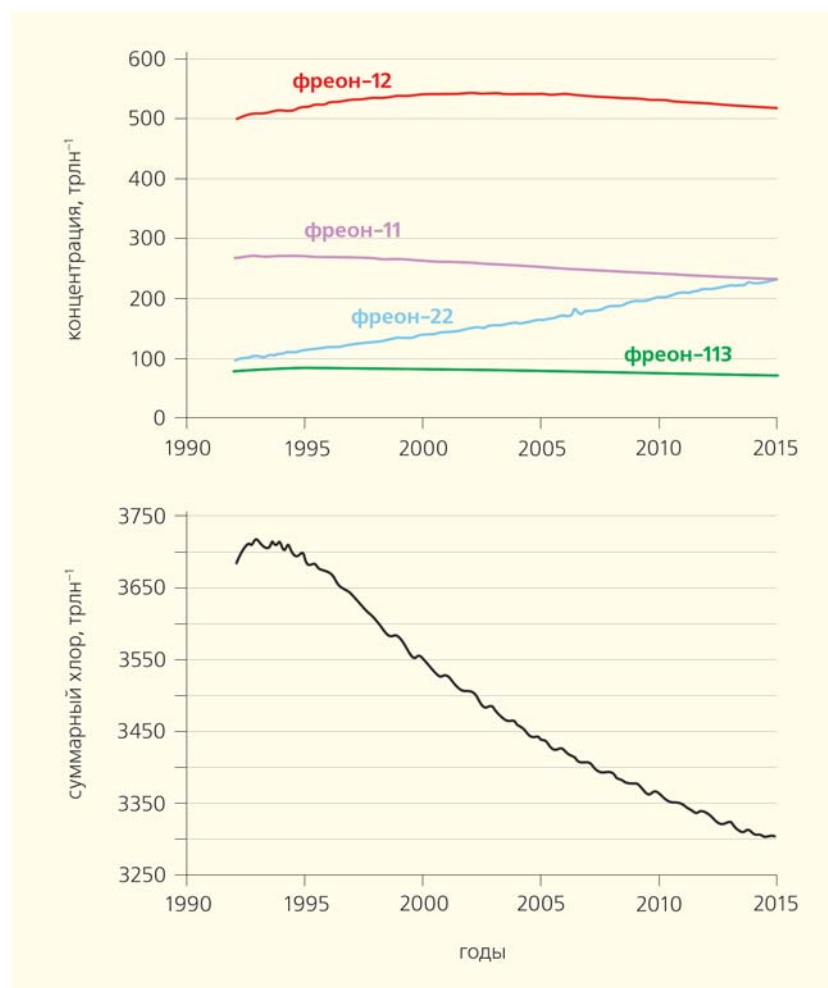
* Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report №52. Chapter 3: Future Ozone and Its Impact on Surface UV (<http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2010/chapters/chapter3.pdf>).

регулярному мониторингу сегодня можно видеть, как изменялись концентрации фреонов в тропосфере за последние годы.

Концентрации фреонов-11 (его время жизни в атмосфере $\tau \approx 45$ лет) и -113 ($\tau \approx 85$ лет) монотонно убывали в течение всего рассмотренного периода: их падение к 2015 г. (относительно уровня 1996 г.) составило 13.4 и 14.1% соответственно. Концентрация же фреона-12 ($\tau \approx 100$ лет) продолжала расти вплоть до 2004 г. и только затем начала снижаться, поэтому ее современное уменьшение относительно 1996 г. — скорее символическое (всего 1.9%). Тем не менее с 2004 г. концентрация фреона-12 снизилась на 4.5%. Отметим, что одновременно с изъятием из обращения фреонов первого поколения произошла их замена на химикаты, менее опасные для озонового слоя. К таковым относится, в частности, «неподсудный» фреон-22 (CHF_2Cl , $\tau \approx 12$ лет): его концентрация за период с 1996-го по 2015 г. возросла на 93%, т.е. почти удвоилась.

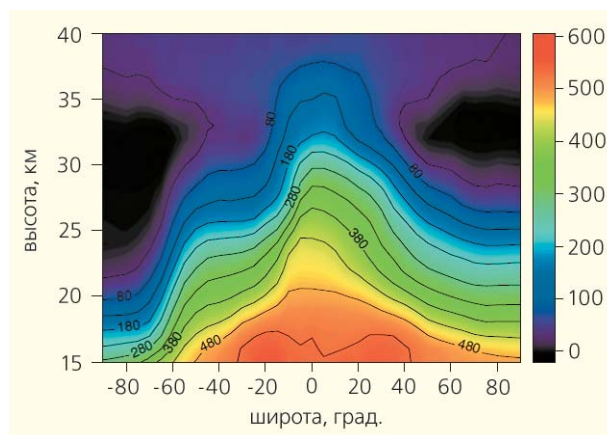
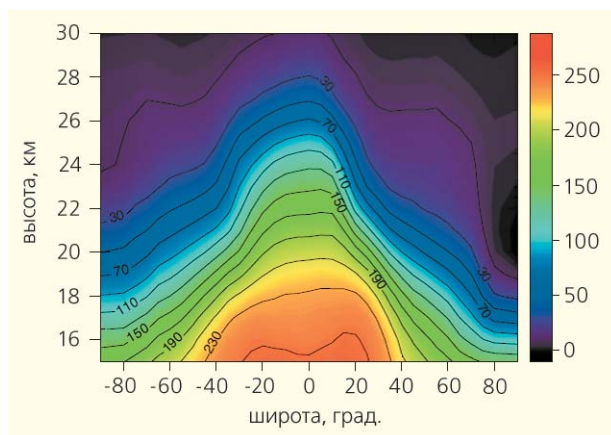
Таким образом, суммарное количество хлора в тропосфере формируется в условиях снижения концентраций соединений, содержащих несколько его атомов. При этом растет содержание их заменителей, как правило, с меньшим количеством атомов хлора и более коротким временем жизни. В результате с 1996 г. наблюдалась тенденция к снижению содержания суммарного (включающего, кроме перечисленных, и другие химикаты, например «антропогенный» метилхлороформ (CH_3CCl_3 , $\tau \approx 6$ лет) и «естественный» метилхлорид (CH_3Cl , $\tau \approx 1$ год)) хлора в тропосфере. Общее снижение за это время составило 10.0%.

Возможно, кто-то из читателей удивится, почему мы столько внимания уделяем тропосфере, тогда как основной удар озону наносится хлорсодержащими соединениями выше, в стратосфере. Этому есть причины. Во-первых, поскольку выбросы фреонов идут от земной поверхности, тропосфера служит своеобразной транзитной зоной на их пути в стратосферу. Во-вторых, контроль за уровнями фреонов в тропосфере налажен значительно лучше, чем в стратосфере. Поэтому получить столь же полную информацию о стратосферном содержании фреонов весьма проблематично.



Изменение концентраций фреонов (вверху) и суммарного хлора в тропосфере. 1 трлн⁻¹ соответствует одной молекуле на 10¹² молекул воздуха.

<http://www.esrl.noaa.gov>



Пространственные распределения концентрации в (трлн⁻¹) фреона-11 в марте 2011 г. (слева) и фреона-12 в сентябре 2008 г. [2], рассчитанные по данным измерений 2002–2011 гг. [3]. Отрицательные широты соответствуют южному полушарию.

На основе измерений 2002–2011 гг. [3] определены характерные пространственные распределения концентраций фреонов-11 и -12, содержание которых в атмосфере значительно больше, чем остальных. Оказалось, что стратосферные концентрации обоих фреонов убывают по мере удаления от экватора к полюсам и с ростом высоты. Анализ этих данных показывает, что в слое 15–20 км скорость снижения концентраций фреонов составляет 20–30 трлн⁻¹/10 лет [3]. Немного более интенсивное падение отмечается в Арктике, а в средних южных широтах на высоте 25 км значительно уменьшается концентрация фреона-12 (79 трлн⁻¹/10 лет). К сожалению, эти данные не охватывают Антарктиду. Тем не менее, нет оснований полагать, что южной полярной области присущи тенденции, принципиально отличные от тех, что имеют место севернее.

Таким образом, можно констатировать повсеместное убывание содержания в атмосфере всех попавших под монреальский запрет фреонов. Однако, ввиду их атмосферного «долгожительства», концентрации по-прежнему остаются весьма высокими. И все же хлорная нагрузка на озоносферу постепенно ослабевает.

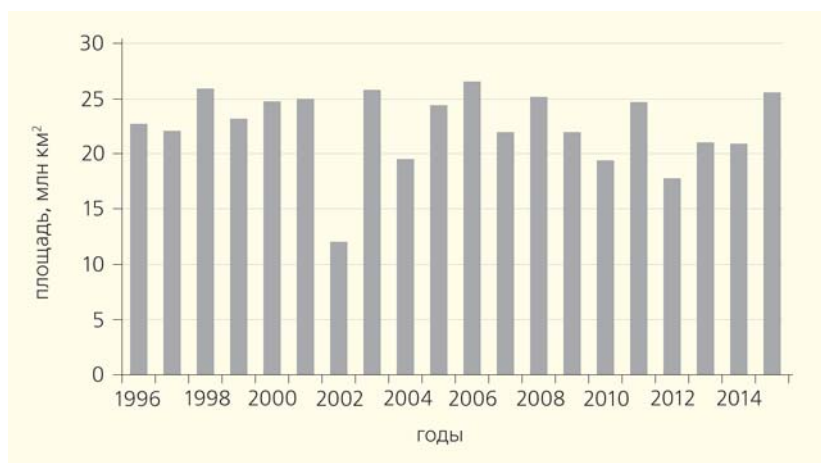
Хроника сезонного озондефицита

Теперь обратимся к другой составляющей логической цепочки — следствию, т.е. к антарктической озоновой дыре. «Озоновый бум» второй половины 1980-х оставил на ледовом континенте наследство в виде целого ряда измерительных станций, по сей день исправно по-

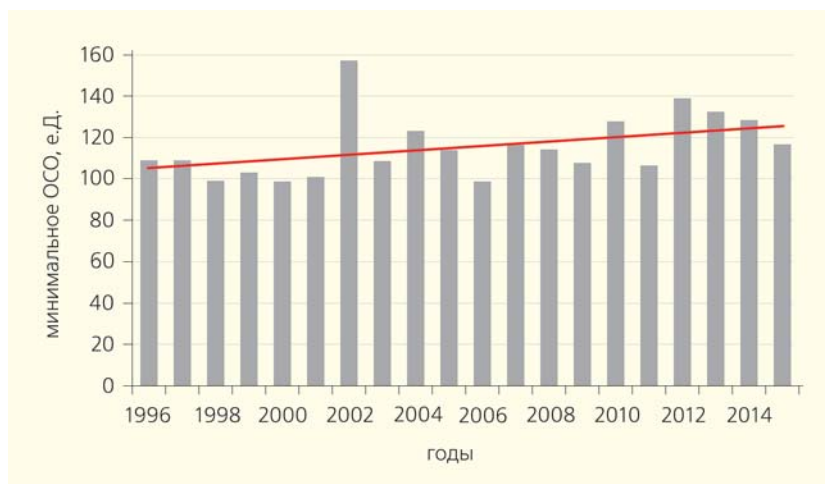
ставляющих информацию о текущем состоянии озонового слоя.

Обычно состояние озоновой дыры характеризуют площадью, которую она охватывает, и ее «глубиной», представляющей собой минимальное значение общего содержания озона (ОСО). Интересно проследить, как менялась площадь озоновой дыры от года к году в течение двух последних десятилетий.

Минимальное и максимальное значения площади в 2002 и 2006 гг. достигали 12 и 26.6 млн км² соответственно, то есть отличались практически вдвое, однако ниже отметки 20 млн км² площадь озоновой дыры опускалась всего четырежды. Средняя же за весь двадцатилетний период площадь равна 22.5 млн км², а это, между прочим, в 1.6 раза больше площади самой Антарктиды! И главное, нет никаких оснований говорить о тенденции к уменьшению: в 2015 г. озоновая дыра занимала наибольшую площадь за последние девять лет — 25.6 млн км².



Средняя за период с 7 сентября по 13 октября каждого года площадь озоновой дыры. <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology>



Среднее за период с 21 сентября по 16 октября каждого года минимальное значение ОСО в озоновой дыре. Красным показан линейный тренд.

<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology>

Другими словами, озоновая дыра по-прежнему «широка», да и «глубока» тоже — ведь так называемой климатической нормой считается величина ОСО, равная 220 е.Д.* Минимальные значения ОСО подвержены значительным межгодовым колебаниям (например, только в последние 10 лет разброс составил 98.2–139.1 е.Д.), на их фоне положительный тренд с ростом 9.7% за 10 лет выглядит не

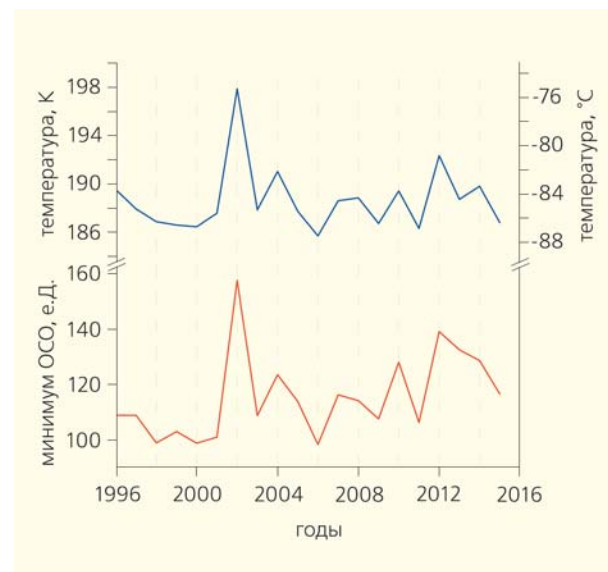
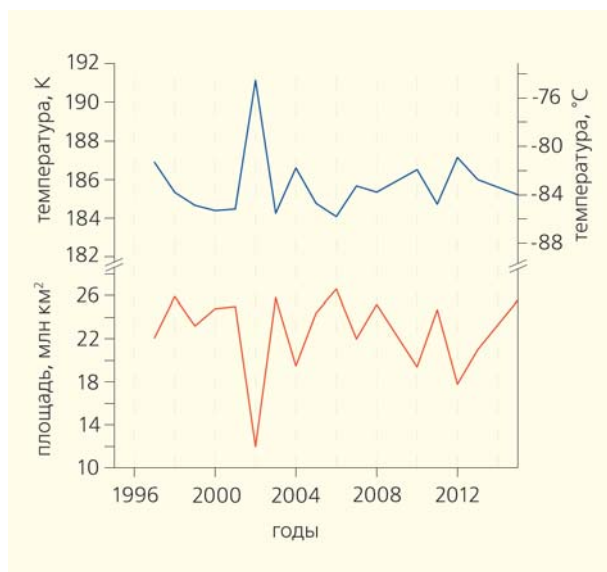
* Одна единица Добсона (е.Д.) соответствует $2.69 \cdot 10^{16}$ молекул озона в столбе атмосферы с основанием в 1 см^2 поверхности Земли.

слишком впечатляюще. Если рассмотреть аналогичный тренд только за последнее десятилетие, то выяснится, что минимальные значения ОСО стали расти вдвое быстрее (21.2% за 10 лет). Вроде бы тенденция к их увеличению очевидна, но... Статистический анализ показывает, что эти тренды (в отличие от тех, о которых пойдет речь далее) на сегодняшний день, увы, незначимы. Так что делать какие-то обобщения и выводы еще рано.

А вот тесную связь между состоянием озоновой дыры и температурой антарктической стратосферы данные измерений подтверждают со всей определенностью, а именно: минимум ОСО и температура совпадают по фазе, а площадь озоновой дыры

и температура находятся в противофазе. Сей факт подтверждается очень высокими коэффициентами корреляции, равными 0.892 и -0.933 соответственно. Таким образом, естественно-природные механизмы формирования озоновой дыры продолжают исправно и эффективно действовать. А что же антропогенный фактор?

Существует еще одна, на наш взгляд, более показательная характеристика озоновой дыры: дефицит озона внутри нее. Некоторые интернет-ресурсы предоставляют соответствующие ежедневные данные за весь период существования «дыры».



Связь между состоянием озоновой дыры и температурой антарктической стратосферы. Слева — средние за период с 7 сентября по 13 октября каждого года температура и площадь озоновой дыры. Справа — средние за период с 21 сентября по 16 октября температура и минимум ОСО. Температура определялась на уровне 70 гПа (около 18 км).

<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology>

Если за появление минимальных значений ОСО во многом ответственны сверхнизкие температуры, имеющие место лишь в течение недолгого периода*, то хлорная нагрузка на озоносферу работает на протяжении всего зимне-весеннего сезона, и, значит, дефицит озона позволяет полнее оценить стратосферную хлорно-озоновую зависимость. Далее мы воспользуемся данными, приведенными на интернет-сервисе TEMIS (Tropospheric Emission Monitoring Internet Service)**.

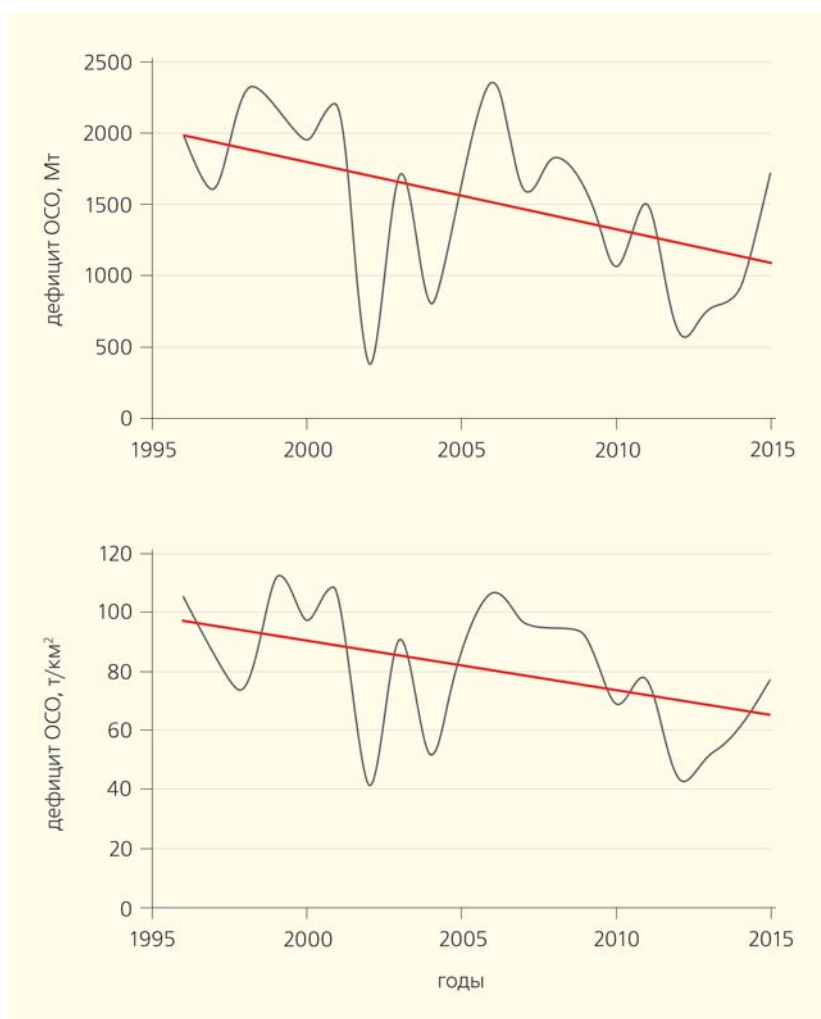
Ежедневный дефицит озона определяется как разность между 220 е.Д. (т.е. климатической нормой) и реальным для этого дня значением ОСО. Естественно, рассматриваются лишь те дни, когда ОСО не превосходит 220 е.Д. Далее полученные на разных станциях величины суммируются. Результаты показывают, что за 20 лет дефицит озона сократился на 14.7%. Однако, очевидно, абсолютное значение дефицита озона зависит от размера «дыры», который изменялся от года к году в широких пределах. Поэтому целесообразно одновременно оценить удельный дефицит озона, т.е. дефицит, приходящийся на 1 км² «дыры». В этом случае оказывается, что дефицит озона сокращается значительно интенсивнее (на 26.5% за два десятилетия). Наличие статистической значимости у этих трендов позволяет утверждать, что «процесс пошел»...

Согласно «графику»?

Еще не стерлась из памяти ожесточенная полемика вокруг Монреальского протокола, причем сомнению подвергалась не только целесообразность подписания этого документа, но и истинность положенных в его основу физико-химических механизмов, породивших озоновую дыру. К сожалению, эта полемика сразу сошла с «науч-

* Согласно цитируемому здесь ресурсу, характерное время существования максимальных площадей озоновой дыры и минимальных значений ОСО составляет примерно один месяц (с 7 сентября по 13 октября и с 21 сентября по 16 октября соответственно).

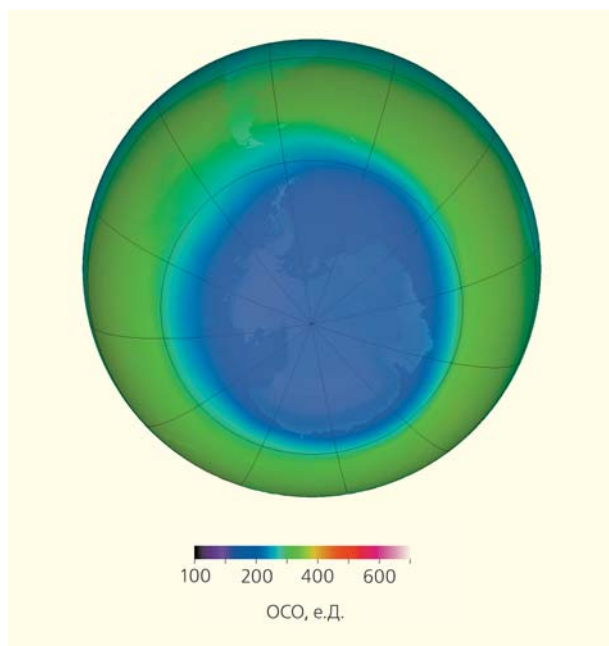
** http://www.temis.nl/protocols/o3hole/o3_history.php?lang=0



Дефицит озона на всей площади озоновой дыры (вверху) и в пересчете на 1 км² (внизу) за весь период ее существования. Красным показан линейный тренд.
http://www.temis.nl/protocols/o3hole/o3_history.php?lang=0

ных рельсов» и перешла в политико-экономическую плоскость. Генеральный секретарь ООН (1997–2006) Кофи Аннан заявил, что «возможно, единственным очень успешным международным соглашением можно считать Монреальский протокол». Его российские оппоненты увидели в принятии протокола попытку удушения «мировым империализмом» отечественной холодильной промышленности и атаку на ее конкурентоспособность, хотя трудно не согласиться с замечанием Б.Жукова: «...Нужно обладать очень богатым воображением, чтобы представить европейские и американские моллы, заставленные рядами холодильников «Ока» и «ЗИЛ»***. Однако весомость всякого мнения зависит от того, насколько оно подкреплено фактами, посему вернемся к современным реалиям. Как можно оценить то, что про-

*** Жуков Б. Протоколы монреальских мудрецов // Телеграф «Вокруг света». 10.10.2007.



Среднее содержание озона над Южным полушарием в сентябре 2015 г.

<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>

исходило с антарктической озоновой дырой в течение двух последних десятилетий? И в какой степени эти факты соответствуют делавшимся ранее прогнозам?

Допускаем, что кому-то по прочтении могло показаться, что в эти годы озоновая дыра жила по своим, одной ей известным законам, напрочь не замечая нашей фреонзапретительной суеты. Действительно, поведение озоновой дыры сегодня во многом определяется тем, сколь низка в сентябре–октябре антарктическая стратосферная температура, которая, впрочем, тоже зависит от эволюции ОСО. Этот фактор остается главенствующим на протяжении ряда лет. Главенствующим, но все-таки не единственным, ведь сверхнизкие температуры в стратосфере Антарктиды наверняка имели место и ранее, задолго до появления озоновой дыры. Резкий рост содержания хлора в атмосфере в 1970–1980-х годах сыграл роль своеобразного спускового механизма, давшего старт обсуждаемому на этих страницах антарктическому феномену. Нынешняя эволюция озоновой дыры происходит на фо-

не все еще высоких концентраций стратосферного хлора, снижение которых до «додырочно-го» уровня должно занять несколько десятилетий. Пока же хлорная нагрузка на атмосферу, как своеобразный «серый кардинал», оказывает значительное влияние на формирование озоновой дыры, при этом довольствуясь внешне неприметной ролью второго плана.

Застало ли врасплох теоретиков наблюдаемое в последние десятилетия поведение озоновой дыры? Если обсуждать общие тенденции, а не нюансы, можно утверждать: нет, не застало. По опубликованным в 2006 г. оценкам П.Ньюмена (P.Newman) с соавторами, площадь озоновой дыры должна медленно сокращаться в 2001–2017 гг., но статистически значимым это сокращение станет не ранее 2024 г. [4]. Эти выводы согласуются с мнением специалистов Национального аэрокосмического агентства США (NASA): «Позитивные изменения в озоновом слое проявятся не раньше 2020 г.»*. Да и темпы восстановления озонового слоя над Антарктидой в 1995–2015 гг., по модельным прогнозам, ожидалось минимальные (для большинства моделей они лежат в пределах десятка процентов)**. Итак, есть основания считать, что эволюция озоновой дыры, по крайней мере пока, в целом соответствует предначертанному теоретиками графику. В дальнейшем, согласно тому же графику, восстановление озонового слоя над Антарктидой должно ускориться вследствие нелинейности происходящих в атмосфере многочисленных фотохимических превращений, в том числе с участием хлорных соединений и озона. А будет ли выдержан этот график на практике, мы скоро узнаем.

«Каждое деяние имеет долговременные последствия»***, — эту мысль П.Коэльо подтверждает история существования озоновой дыры. Человек сравнительно быстро создал предпосылки для ее возникновения, на исправление сложившейся ситуации природе нужно гораздо больше времени... Очень хочется, чтобы этот урок не прошел для нас даром. ■

* http://www.nasa.gov/topics/earth/features/2009_anta.html

** Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report №52. Chapter 3: Future Ozone and Its Impact on Surface UV (<http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2010/chapters/chapter3.pdf>).

*** Коэльо П. Книга война света. М., 2009.

Литература

1. Кароль И.Л., Киселев А.А. Парадоксы климата. М., 2013.
2. Clarmann T. von. Chlorine in the stratosphere // Atmosphaera. 2013. V.26. №3. P.415–458.
3. Kellmann S., Clarmann T. von, Stiller G.P. et al. Global CFC-11 (CCl₃F) and CFC-12 (CCl₂F₂) measurements with the Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS): retrieval, climatologies and trends // Atmospheric Chemistry and Physics. 2012. V.12. P.11857–11875. Doi:10.5194/acp-12-11857-2012.
4. Newman P.A., Nash E.R., Kawa S.R. et al. When will the Antarctic ozone hole recover? // Geophysical Research Letters. 2006. V.33. L12814. Doi:10.1029/2005GL025232.

Как возникли жаберные щели?

О.В.Ежова, В.В.Малахов

Все хорошо представляют, как выглядят у костных рыб (например, у щуки или окуня) жабры — они скрыты костяными крышками. У хрящевых рыб (акул и скатов) жаберные щели видны снаружи, они напрямую соединяют передний отдел кишечника с внешней средой (рис.1,*а,б*). У более примитивных бесчелюстных позвоночных (например, у миног) это жаберные мешки — метамерные выросты кишечника, открывающиеся во внешнюю среду серией округлых отверстий по бокам тела (рис.1,*в*).

Жаберные щели есть не только у позвоночных, но и у других подтипов типа хордовых. У ланцетников (небольших донных животных, похожих на маленьких рыбок, которые входят в подтип бесчерепных) жаберные щели представляют собой серию из более чем сотни метамерных отверстий, проникающих в кишечную трубку в передней половине тела (рис.1,*г*). Есть жаберные щели и у еще одного подтипа хордовых животных — оболочников, которые так называются потому, что их тело заключено в оболочку из особого материала туницина, похожего на целлюлозу. Среди оболочников есть сидячие организмы — асцидии (рис.1,*д*), а также плавающие в толще воды животные — бочончники, сальпы, огнетелки и аппендикулярии (рис.1,*е*). Все ископаемые хордовые тоже имели жаберные щели (рис.2).



Владимир Васильевич Малахов, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой зоологии беспозвоночных биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, руководитель лаборатории биологии морских беспозвоночных Дальневосточного федерального университета (Владивосток). Область научных интересов — сравнительная анатомия, эмбриология и филогения беспозвоночных.



Ольга Владимировна Ежова, кандидат биологических наук, доцент той же кафедры, сотрудник той же лаборатории. Специалист в области морфологии и тонкой организации кишечнодышащих, морских звезд, офиур и голотурий; занимается изучением эволюции амбулакралий, морфологии, микроскопической анатомии ультраструктуры полухордовых, иглокожих и хордовых.

Ключевые слова: хордовые, жаберные щели, полухордовые, иглокожие, вторичноротые, происхождение жаберных щелей.

Key words: chordates, gill slits, hemichordates, echinoderms, deuterostomes, gill slit origin.

У хордовых животных жаберные щели служат не только для дыхания, но и для фильтрации, что позволяет извлекать из воды мелкие пищевые объекты. Так питаются не только оболочники и ланцетники, но и многие рыбы, в том числе и самая крупная из них — китовая акула (см. рис.1,*а*).

Эволюция жаберных щелей представляет собой одну из самых увлекательных глав сравнительной анатомии позвоночных животных. По мнению К.Егенбауэра, А.Н.Северцова, И.И.Шмальгаузена и других выдающихся сравнительных анатомов XIX–XX вв., с жаберными щелями связано развитие важнейших структур в челюстном аппарате, органах чувств и кровеносной системе. Но несмотря на это, до сих пор в зоологии не существует внятной гипотезы, объясняющей, как возникли столь таинственные, своеобразные органы — метамерные жаберные щели, напрямую соединяющие полость энтодермального кишечника с внешней средой.

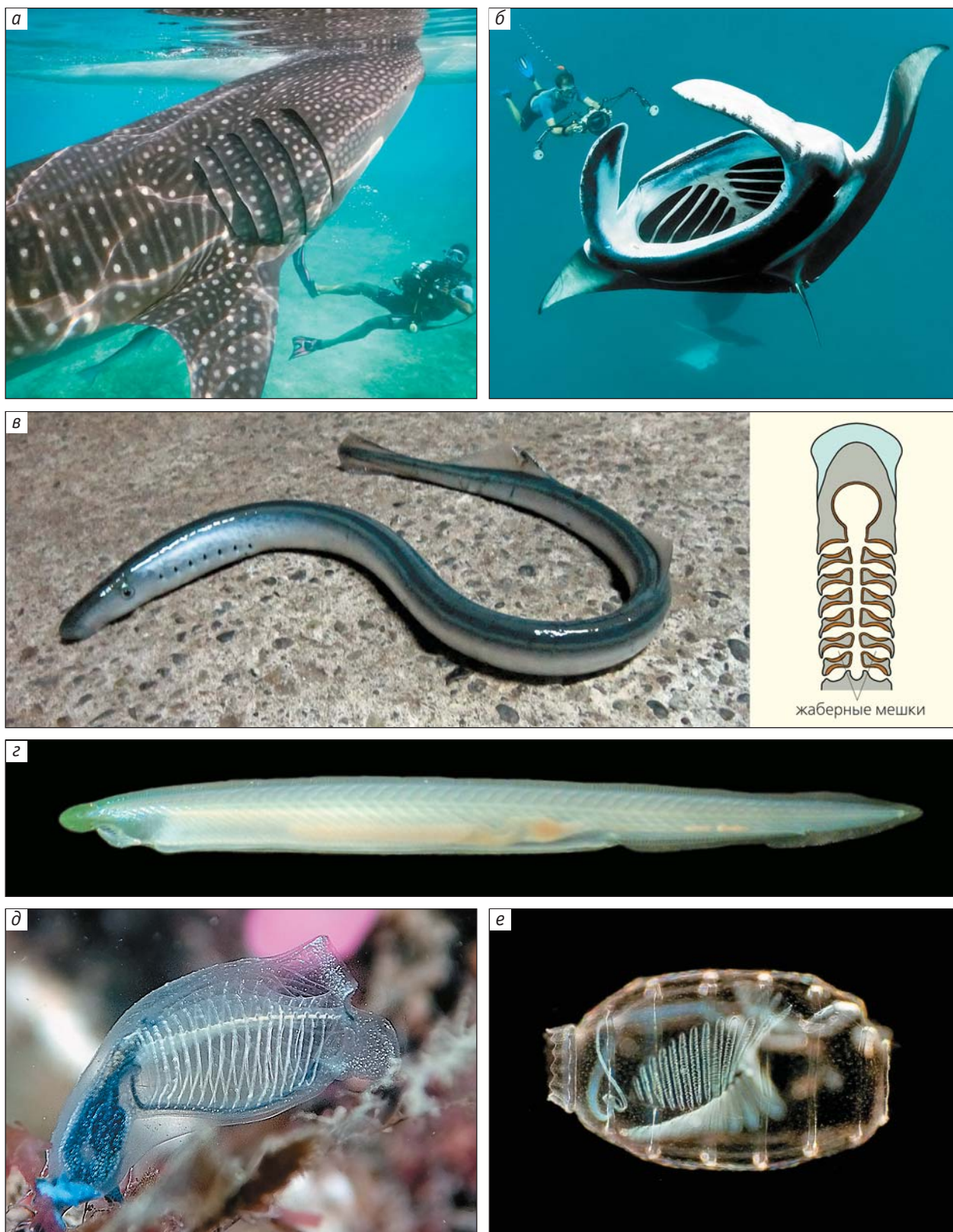


Рис.1. Жаберные щели у хрящевых рыб (китовой акулы — а и манти — б), у современного представителя бесчелюстных — речной миноги (в; справа — схема фронтального среза миноги, на котором видны энтодермальные жаберные мешки) и жабры у низших хордовых: ланцетника (г), асцидии (д), бочоночника (е).

Фото с сайтов: funniestmemes.com, discoverymaldives.com, tumblr.com, faculty.baruch.cuny.edu

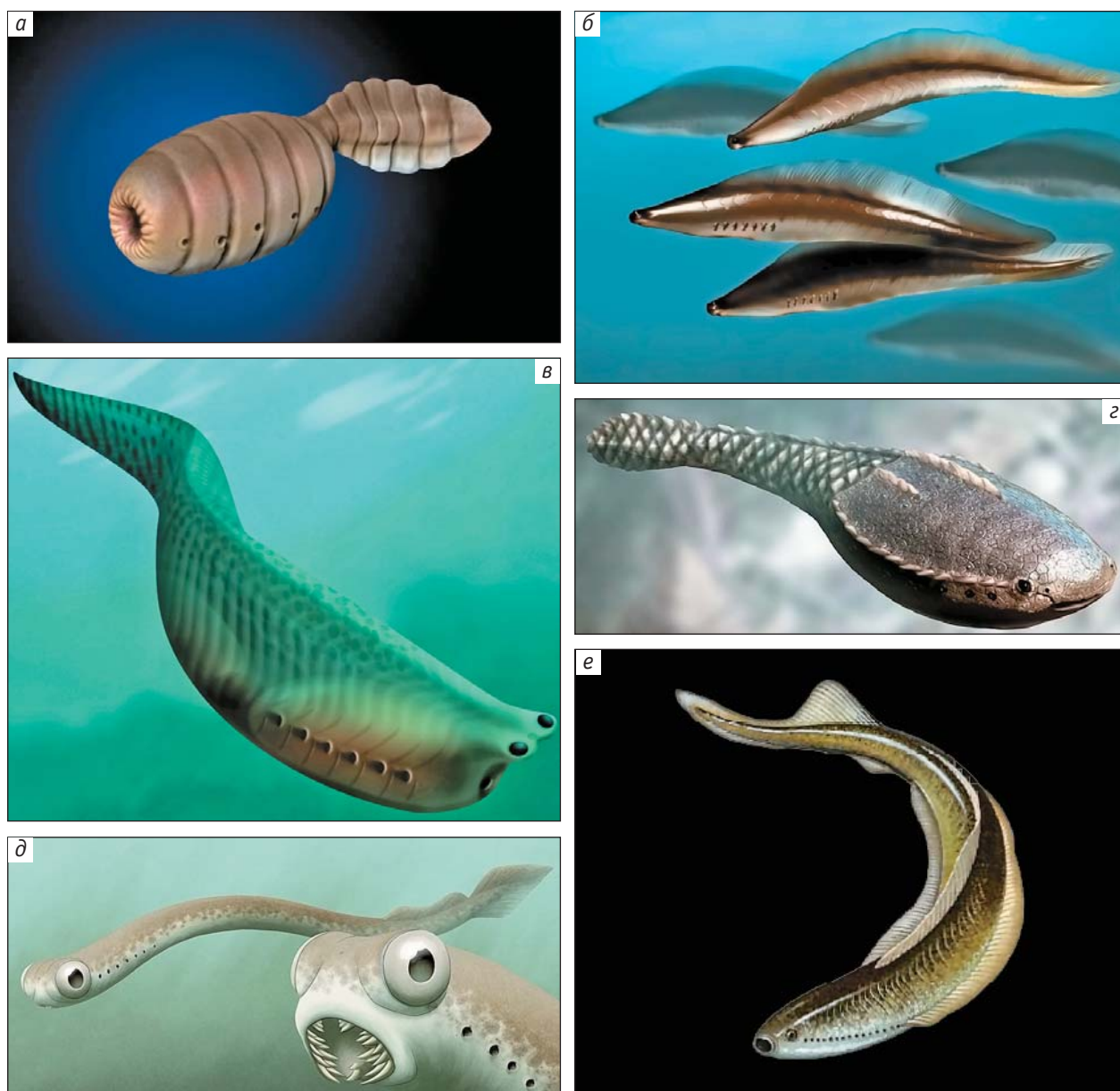


Рис.2. Ископаемые хордовые с жаберными щелями: а — *Didazon hooae* (ранний кембрий), б — *Haikouichthys ercaicunensis* (ранний кембрий), в — *Metaspriggina walcotti* (средний кембрий), г — *Astraspis desiderata* (поздний ордовик), д — конodontы (ордовик-девон), е — *Jamoytius* (ордовик-силур).

Фото с сайтов: spinops.blogspot.ru, anthropology-news.org, tumblr.com, dinopedia.wikia.com, pvsm.ru

Эволюция жаберных щелей у позвоночных

У позвоночных жаберные щели имеют хрящевой или костный скелет — жаберные дуги (рис.3). Одна из передних дуг у большинства позвоночных изменила свою функцию — превратилась в челюсти, благодаря которым все современные челюстноротые позвоночные (кроме миног и миксин) имеют возможность хватать, откусывать и пережевывать добычу. За челюстной жаберной дугой следует так называемая подчелюстная дуга. Между двумя этими дугами у хрящевых рыб (например,

акулы) даже сохраняются рудиментарные жаберные щели — брызгальца. У большинства рыб подчелюстная дуга обеспечивает подвижную связь челюстей с черепной коробкой. Челюсти как бы подвешены снизу к черепной коробке с помощью парных «подвесок» (по латыни эти хрящи или косточки называются *hyomandibulare*).

У позвоночных жаберные щели и кровеносные дуги связаны между собой (рис.4), ведь жабры — основной орган газообмена: к ним притекает бедная кислородом кровь, в них она обогащается кислородом и далее несет его ко всем органам животного.

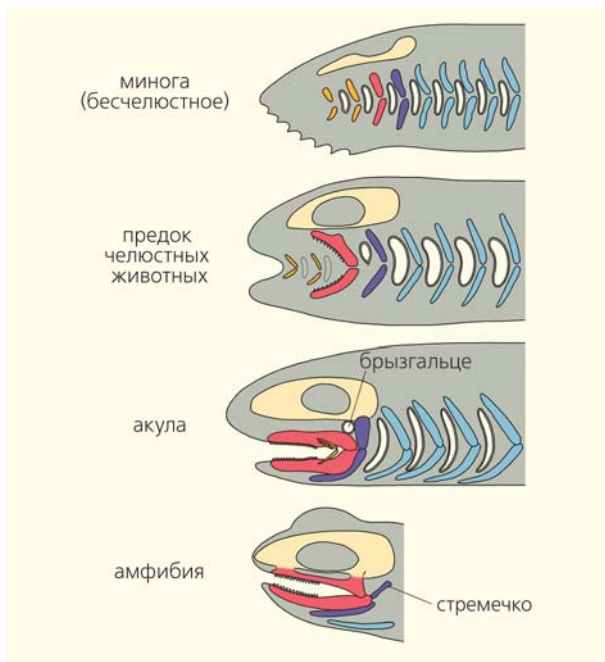


Рис.3. Эволюция жаберных дуг у позвоночных животных: желтым показаны губные хрящи, красным — челюстная дуга, фиолетовым — подчелюстная дуга и ее производные, голубым — жаберные дуги задних жаберных щелей и подчелюстной аппарат ([1; 2], с изм.).

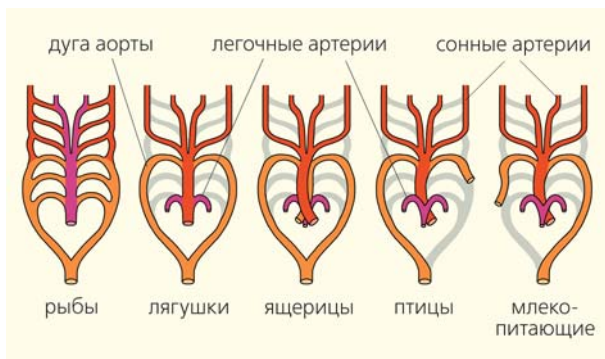


Рис.4. Эволюция жаберных кровеносных дуг у водных и наземных позвоночных ([2], с изм.).

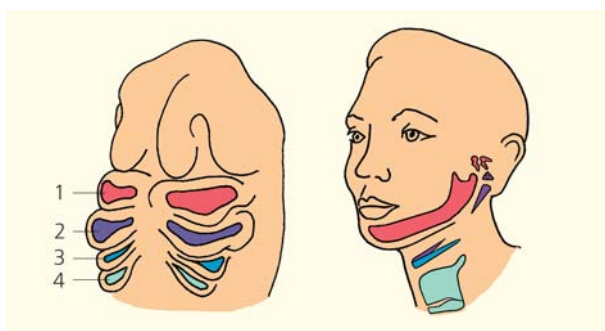


Рис.5. Преобразование жаберных дуг зародыша человека; цифрами обозначены номера жаберных дуг ([3], с изм.).

У наземных позвоночных во взрослом состоянии жаберных щелей нет, но элементы жаберного скелета, естественно, сохраняются. У таких животных (амфибий) верхняя челюсть прирастает к черепной коробке. «Подвески» освобождаются от функции прикрепления челюстей к черепу и приобретают новую функцию: они превращаются в слуховые косточки — стремечко, а полость брызгальца становится полостью среднего уха. Скелет последующих жаберных щелей превращается в подъязычный аппарат, щитовидные хрящи, хрящи гортани и трахеи. Жаберные кровеносные дуги водных позвоночных преобразуются у наземных в главные сосуды кровеносной системы — сонные артерии, дуги аорты и легочные артерии (рис.4).

Даже в развитии человеческого зародыша закладываются жаберные щели. Хрящевые зачатки жаберных дуг дают важнейшие элементы скелета человека — челюсти, слуховые косточки, шиловидный отросток височной кости и хрящи гортани. Любой дефект в развитии жаберных щелей приводит к необратимым нарушениям и гибели зародыша человека (рис.5). Так что можно сказать, что без них и человек не был бы человеком.

Все изложенное показывает, как много элементов строения тела высших позвоночных, включая человека, происходит от жаберных щелей. Между тем само их происхождение остается неразгаданной тайной эволюционной морфологии животных. В самом деле, как можно представить себе происхождение многочисленных дырок, связывающих кишку с внешней средой? По какой причине могли возникнуть такие дырки? Какие органы могли дать начало жаберным щелям? Какова их первичная функция? На эти вопросы не только нет ответа, но они, по существу, даже не ставятся — по-видимому, мы слишком привыкли к тому, что жаберные щели существуют как характерный признак типа хордовых, и нечего об этом спрашивать. Чтобы попытаться ответить на вопрос о происхождении жаберных щелей, придется выйти за пределы типа хордовых.

Жаберные щели вторичноротых животных

Хордовые входят в состав вторичноротых животных — одной из главных филогенетических ветвей билатерально симметричных животных, которая очень рано обособилась от общего корня билатерий [4]. Два других типа в составе вторичноротых — полухордовые и иглокожие. Согласно современным представлениям, основанным на данных молекулярной филогенетики, иглокожие и полухордовые — это родственные типы, образующие кладу *Ambulacraria*. Заметим, что впервые на филогенетическую близость иглокожих и полухордовых указал выдающийся российский биолог И.И.Мечников [5], который и ввел в научный обиход название *Ambulacraria*.

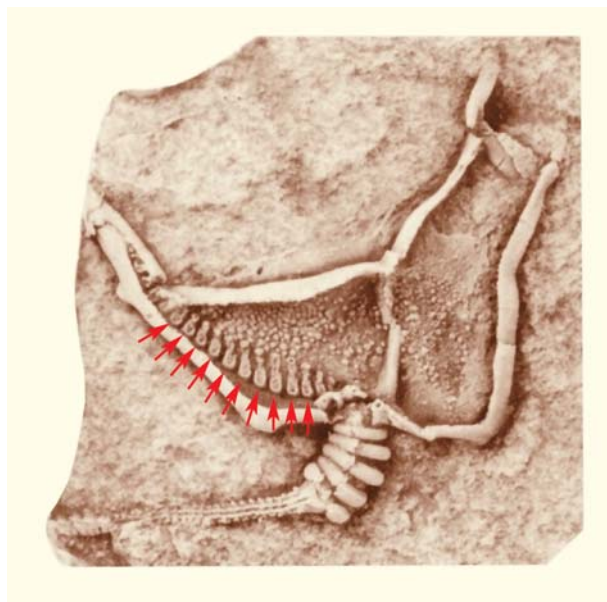


Рис.6. Ископаемое иглокожее *Cothurnocystis elizae* (Calcichordata) [6]. Стрелками показаны метамерные жаберные щели.

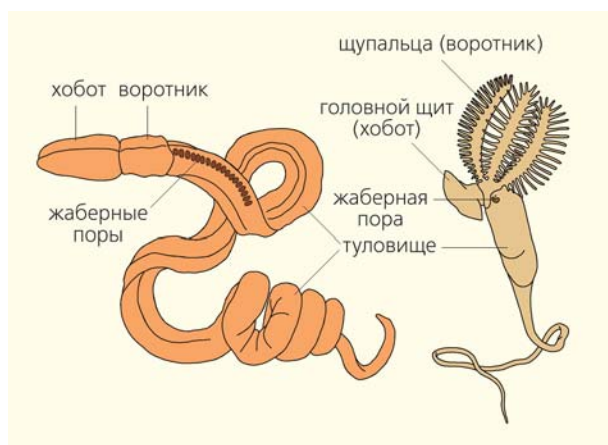


Рис.7. Строение кишечнодышащих (слева) и крыложаберных животных.

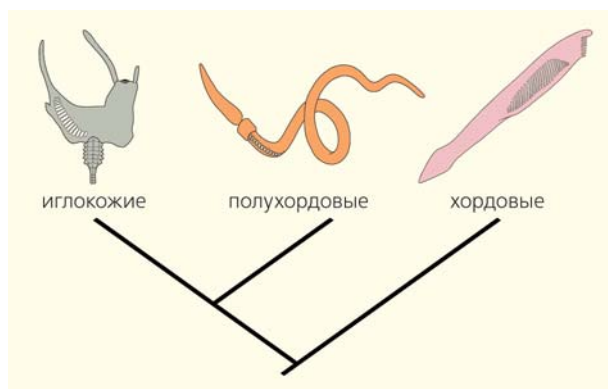


Рис.8. Три типа вторичноротых животных. В каждом типе есть представители с многочисленными жаберными щелями.

Иглокожие широко распространены в морях и океанах планеты. Это морские звезды, морские ежи, офиуры-змеихвостки, голотурии и морские лилии. Ни у кого из современных иглокожих жаберных щелей нет. Однако, у этих животных есть известковый скелет, был он и у их предков, поэтому палеонтологическая история иглокожих хорошо известна. Оказывается, самые древние кембрийские иглокожие, выделяемые в подтип Calcichordata, или Carozoa, обладали серией отверстий [6], которые рассматриваются как гомологи жаберных щелей позвоночных (рис.6).

Полухордовые — тоже морские животные. В состав этого типа входят две группы, очень непохожие друг на друга, — кишечнодышащие и крыложаберные. Кишечнодышащие — довольно крупные морские черви, обитающие в толще грунта. На пляжах Бразилии в приливно-отливной полосе обитает *Balanoglossus gigas*, который достигает в длину 2 м. Исследования последних лет показали, что на больших глубинах (более 2 км) Мирового океана скрывается богатая и разнообразная фауна кишечнодышащих [7, 8]. Тело взрослых особей подразделяется на три отдела: мускулистый хобот, воротник, где располагается рот, и длинное туловище, в передней части которого открываются многочисленные (до 200 пар) метамерные жаберные щели (рис.7). Крыложаберные — это мелкие колониальные организмы. На воротниковом отделе они несут щупальца, с помощью которых собирают пищу — мелкую органическую взвесь. Крыложаберные тоже имеют жаберные щели, но их немного — одна или две пары (см. рис.7).

Таким образом, жаберные щели есть у животных всех трех типов, входящих в состав вторичноротых (рис.8). Это означает, что, скорее всего, жаберные щели были унаследованы от общего предка вторичноротых животных. Биологи называют такие унаследованные от общего предка признаки синапоморфиями. Мы можем с полным основанием утверждать, что жаберные щели — это важная синапоморфия вторичноротых животных.

Происхождение жаберных щелей

Чтобы попытаться понять происхождение жаберных щелей, надо разобраться в том, как они устроены у низших вторичноротых животных, а именно у полухордовых. Рассмотрим организацию жаберного аппарата на примере типичных кишечнодышащих. В передней части туловищного отдела кишечник с двух сторон пронизан жаберными щелями, которые имеют подковообразную форму. Они открываются не прямо во внешнюю среду, а в жаберные мешки, которые представляют собой выросты кишечника. А уже жаберные мешки соединяются с внешней средой метамерными порами, располагающимися по бокам туловища (рис.9).

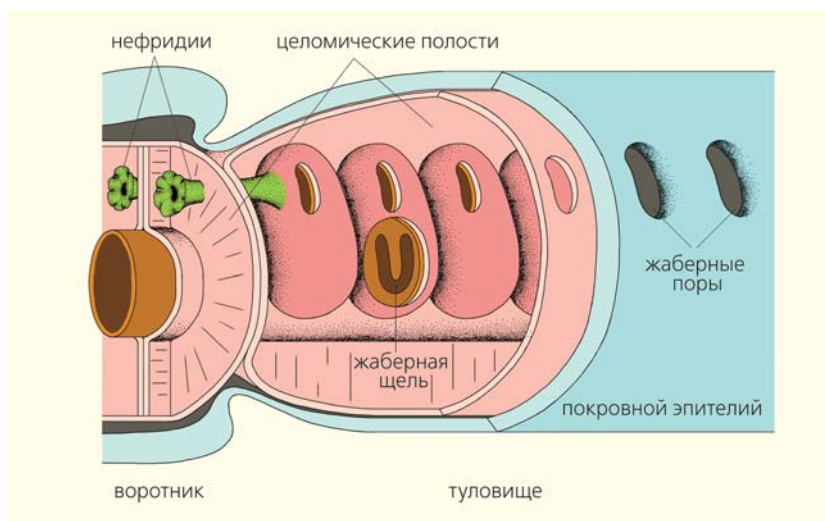


Рис.9. Устройство жаберного аппарата кишечнодышащих (по [9], с изм.). Второй жаберный мешок частично вскрыт, и видна жаберная щель кишечника.

Первая пара жаберных мешков имеет особое строение. В них открывается первая пара жаберных щелей, и одновременно в них же открываются выделительные органы (нефридии), выводящие продукты обмена из воротникового отдела. Таким образом, первая пара жаберных мешков выполняет двойную функцию — дыхательную и выделительную. Такое слияние нефридиев и первых жаберных щелей у кишечнодышащих позволило нам предложить гипотезу происхождения метамерных жаберных щелей от метамерных выделительных органов, первоначально располагавшихся в каждом сегменте тела предков вторичноротых [10].

Современные данные по филогении животного царства позволяют предположить, что общий предок билатерально симметричных животных был сложно устроенным метамерным организмом [4]. Вторичная полость тела такого организма

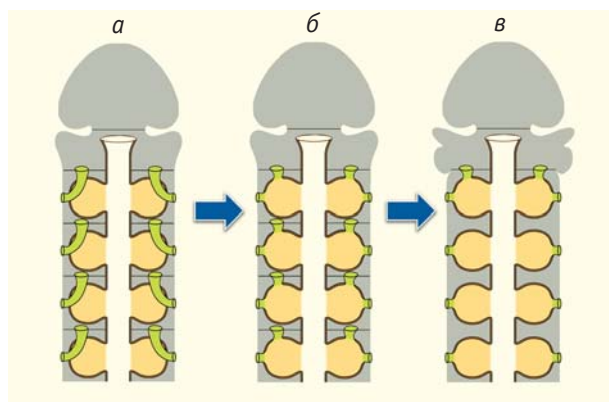


Рис.10. Гипотеза происхождения жаберных щелей в результате слияния метамерных выделительных органов с метамерными карманами кишечника. Пояснения в тексте.

была метамерна, т.е. разделена на сегменты перегородками — диссепиментами. В каждом сегменте имелась пара боковых выростов кишечника (дивертикулов) и пара выделительных органов — целомодуков. Воронки целомодуков всегда располагаются на диссепименте, а каналы и выделительные поры находятся в соседнем сегменте. Такой предок дал начало и первичноротым животным (кольчатым червям, моллюскам, членистоногим и др.), и вторичноротым (рис.10,а).

Согласно нашей гипотезе, у предков вторичноротых каналы выделительных органов соединились с кишечными карманами (рис.10,б). В результате в каждом сегменте сформировалась пара сложных органов, в состав которых вошли карманы кишечника и выделительные органы. Каждый такой орган имел три отверстия: воронку выделительного органа, щель, ведущую в кишечник, и отверстие во внешнюю среду (рис.10,б). Такое соединение оказывается выгодным для животных, ведущих роющий образ жизни (как современные кишечнодышащие) или обитающих в трубках (как современные крыложаберные). Когда животное закапывается в толщу осадка, продукты обмена выводятся через кишечник, а когда высовывается из грунта — через наружные отверстия в воду.

Заметим, что у большинства роющих животных происходит редукция перегородок между сегментами. Причины этого кроются в том, что роющие червеобразные беспозвоночные, как правило, используют для передвижения в толще грунта гидравлический способ локомоции, при этом полостная жидкость перекачивается вдоль оси животного. Перегородки между сегментами препятствуют этому и потому редуцируются, нередко вместе с поддерживаемыми ими нефридиями.

У современных кишечнодышащих только первая пара жаберных щелей соответствует по своей организации тому сложному органу, который имелся у предков вторичноротых во всех сегментах (рис.9, 10,б). Здесь имеется все, что нужно: воронки выделительных органов, открывающиеся в предыдущий сегмент (воротниковый отдел), дивертикул кишечника (первый жаберный мешок) и отверстие во внешнюю среду. Кишечные дивертикулы последующих сегментов утратили воронки выделительных органов, сохранив только два отверстия — в кишечник и во внешнюю среду (рис.10,в).

Появление отверстий, которые соединяют дивертикулы кишечника с внешней средой, позволило гипотетическим сложным органам осуще-

ствлять две функции — и выделительную, и дыхательную. Это вполне очевидно для первой пары жаберных мешков современных кишечнодышащих. Однако, как оказалось, у этих животных стенки других жаберных мешков тоже сохраняют выделительную функцию. Со стороны целома они окружены специализированными выделительными клетками — подоцитами, которые обеспечивают ультрафильтрацию из целома в полость жаберных мешков [11].

Наша гипотеза позволяет проследить связь специфических органов вторичноротых животных — жаберных щелей — с метамерными органами, имеющимися у других билатерально симметричных животных, а именно с метамерными целомодуктами и метамерными дивертикулами кишечника. Гипотеза объясняет энтодермальную природу жаберных мешков и у полухордовых, и у низших хордовых вплоть до современных бесчелюстных — миног. Вряд ли можно считать случайным и то, что жаберные мешки и жаберные щели сохраняют выделительную функцию — и не только у полухордовых, но и у позвоночных животных. Хорошо известно, что жаберные мешки миног и жабры рыб выполняют не только дыхательную, но и экскреторную функцию [12].

В заключение мы считаем нужным отметить, что предлагаемая гипотеза, как бы авторам этого

ни хотелось, не является абсолютно новой. Очень близкие взгляды высказывал еще в 1875 г. выдающийся немецкий биолог, основатель всемирно известной Неаполитанской зоологической станции, Антон Дорн. Он предполагал, что у метамерного предка хордовых животных произошло слияние метамерных нефридиев и метамерных выростов кишечника, которые соединились с внешней средой и дали начало жаберным щелям: «Если мы теперь представим себе, что в различных точках внутренние отверстия сегментальных органов сольются со стенкой кишечника, то установится постулированная нами связь кишечника с внешней средой, помимо ротового и заднепроходного отверстия. <...> Мы уже предположили выше, что между сегментальными органами и кишкой установилась связь, — возможно, что связь эта была вызвана или по крайней мере поддержана образованием выростов кишечника» [13]. Современники не обратили внимания на интересную гипотезу Дорна, вероятно, потому, что ее автор высказал эту идею, так сказать, походя, при обсуждении других вопросов, и не снабдил ее иллюстрациями. Гипотеза Дорна была полностью забыта почти на полтора столетия. Но «время — честный человек», как сказал Пьер Огюстен Бомарше в своей бессмертной «Женитьбе Фигаро», и время, как мы видим, подарило гипотезе Дорна вторую жизнь в XXI в. ■

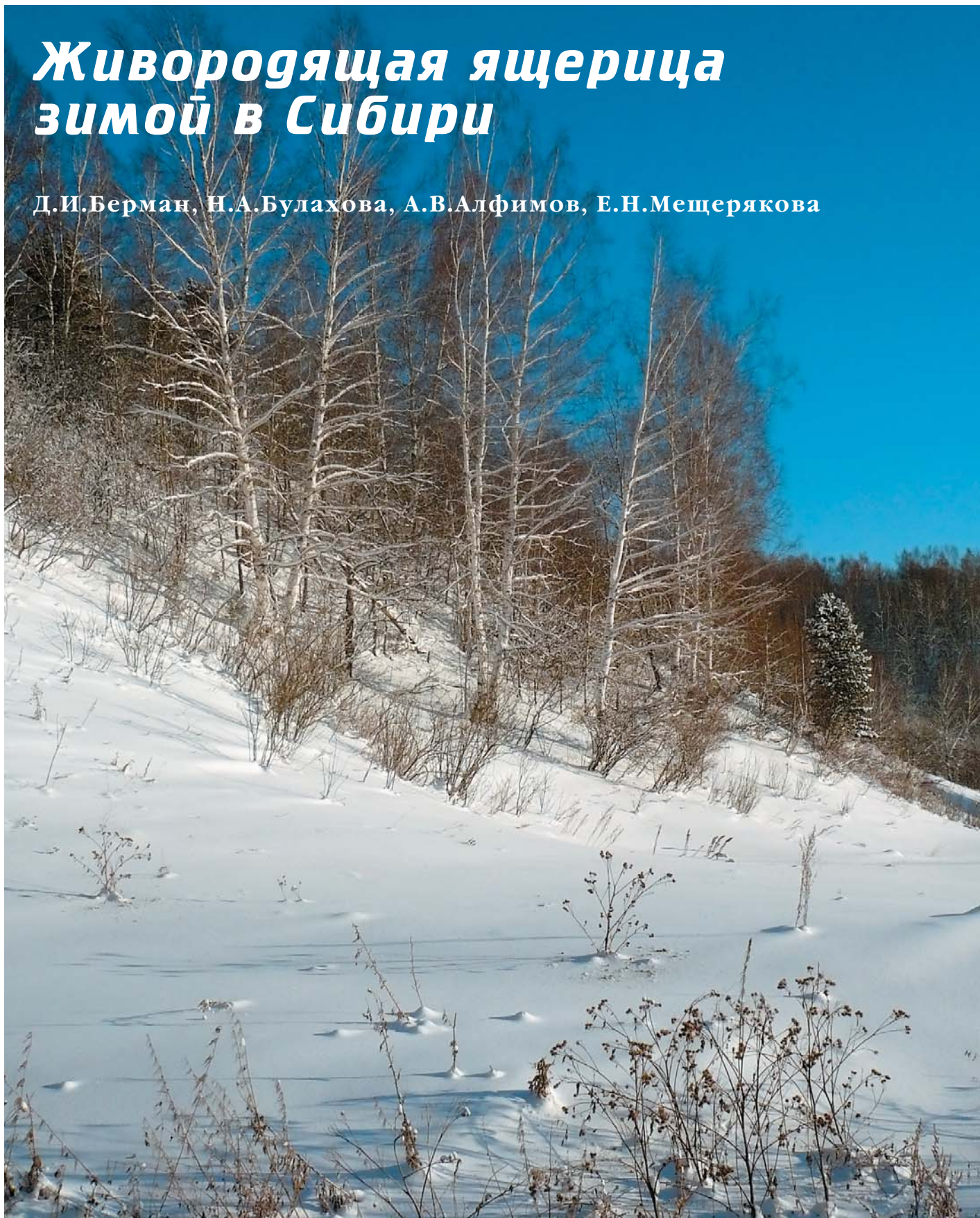
Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Проект 14-50-00034.

Литература

- Северцов А.Н. Морфологические закономерности эволюции. М.; Л., 1939.
- Шмальгаузен И.И. Основы сравнительной анатомии позвоночных животных. М., 1947.
- Shubin N.* Your Inner Fish: A Journey into the 3.5-Billion-Year History of the Human Body. Pantheon. 2008. [Шубин Н. Внутренняя рыба. История человеческого тела с древнейших времен до наших дней / Пер. с англ. П.Петрова. М., 2010.]
- Малахов В.В.* Революция в зоологии: новая система билатерий // Природа. 2009. №3. С.40–54.
- Metschnikoff E.E.* Über die Systematische Stellung von Balanoglossus // Zool. Anziger. 1869. Bd.4. S.139–143, 153–157.
- Jefferies R.P.S., Brown N.A., Daley P.E.J.* The Early Phylogeny of Chordates and Echinoderms and the Origin of Chordate Left-Right Asymmetry and Bilateral Symmetry // Acta Zool. (Stockh.). 1996. V.77. №2. P.101–122.
- Holland N.D., Clague D.A., Gordon D.P. et al.* ‘Lophenteropneust’ hypothesis refuted by collection and photos of new deep-sea hemichordates // Nature. 2005. V.434. P.374–376. Doi:10.1038/nature03382.
- Priede I.G., Osborn K.J., Gebruk A.V. et al.* Observations on torquaratorid acorn worms (Hemichordata, Enteropneusta) from the North Atlantic with descriptions of a new genus and three new species // Invertebrate Biology. 2012. V.131. №3. P.244–257. Doi:10.1111/j.1744-7410.2012.00266.x.
- Balsler E.J., Ruppert E.E.* Structure, ultrastructure, and function of the preoral heart-kidney in *Saccoglossus kowalevskii* (Hemichordata, Enteropneusta) including new data on the stomochord // Acta Zool. (Stockh.). 1990. V.71. P.235–249.
- Ezbova O.V., Malakhov V.V.* The nephridial hypothesis of the gill slit origin // J. Exp. Zool: (Mol. Dev. Evol.). 2015. V.324B. P.647–652. Doi:10.1002/jez.b.22645.
- Pardos F., Benito J.* Fine structure of the branchial sacs of *Glossobalanus minutus* (Enteropneusta) with special reference to podocytes // Arch. Biol. 1988. №99. P.351–363.
- Наумов Н.П., Карташев Н.Н.* Зоология позвоночных. Часть 1: Низшие хордовые, бесчелюстные, рыбы, земноводные. М., 1979.
- Dobrjn A.* Der ursprung der wirbelthiere und das princip des functionswechsels. Genealogische skizzen. 1875. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann. P.10–17. [Дорн А. Происхождение позвоночных животных и принцип смены функции / Пер с нем. Б.И.Балинского. М.; Л., 1937. С. 104–105, 112.]

Живородящая ящерица зимой в Сибири

Д.И.Берман, Н.А.Булахова, А.В.Алфимов, Е.Н.Мещерякова





Здесь и далее фото авторов



Даниил Иосифович Берман, доктор биологических наук, заведующий лабораторией биоценологии Института биологических проблем Севера ДВО РАН (Магадан). Специалист в области экологии северных организмов и палеоэкологии плейстоцена. Член редколлегии и постоянный автор журнала «Природа».



Нина Антоновна Булахова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории, старший научный сотрудник лаборатории биоразнообразия и экологии Томского государственного университета. Область научных интересов — популяционная экология и адаптивные стратегии пойкилотермных животных.



Аркадий Васильевич Алфимов, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биоценологии Института биологических проблем Севера ДВО РАН. Область научных интересов — палео- и современный климат, микроклимат почвенного яруса экосистем северо-востока Азии.



Екатерина Николаевна Мещерякова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Занимается изучением холодоустойчивости беспозвоночных животных.

Ключевые слова: живородящая ящерица, холодоустойчивость, места зимовки, Якутия, таликовые зоны.

Key words: *Zootoca vivipara*, cold hardiness, hibernacula, Yakutia, talik zones.

Животные или растения с обширным ареалом — дело обычное. Неслучайно многих из них ученые именуют обыкновенными. С таким видовым названием есть и сосна, и лисица, и белка, и ворон, и гадюка, и окунь, и щука, а также тьма разных насекомых и прочих беспозвоночных. Обыватель воспринимает подобные виды (пусть даже нечетко выделяя их среди сородичей) как некий повсеместный атрибут природы. Узнав, что где-либо в пригороде нет, к примеру, белок (или лисиц, или ворон, или щук), даже неспециалист начинает беспокоиться: «Все ли благополучно в этой местности с экологией?».

© Берман Д.И., Булахова Н.А., Алфимов А.В., Мещерякова Е.Н., 2016



Это не фотография варана с о. Комодо, а сильно увеличенный портрет живородящей ящерицы, масса которой редко превышает 5 г при длине тела до 7 см.

Большой ареал непременно связан с экологической пластичностью вида, способностью приспособиться к самым разнообразным условиям. Лисица (или ворон) в сухих степях и в тундре — разные, по существу, животные в принципиально разном климате, с отличающимися рационами, наконец — с совсем непохожими соседями, дружелюбными и не очень.

Среди широко распространенных есть животные, к адаптивному возможностям которых мы относимся с уважительным удивлением. Прежде всего это виды экстремальных (по человеческим меркам) регионов: чрезмерно холодных, жарких, сухих, сырых, засоленных и т.д. Они привлекают к себе внимание как маркеры границ жизни, вызывают восхищение совершенством приспособленности и порождают стремление утилитарно использовать их способности в качестве инженерных моделей. В числе экстремалов — земноводные и пресмыкающиеся, живущие далеко на севере.

На страницах «Природы» и других российских журналов много написано о сибирском углозубе (*Salamandrella keyserlingii*) — «идеальном приспособленце», способном безбедно существовать бог знает в каких условиях, несомненно экстремальных с биологической точки зрения*. Ему не помеха ни жестокие зимние морозы, ни многократные циклы замерзания-оттаивания, ни краткость северного лета с его совсем не летними температурами (половой цикл протекает на севере Азии менее чем за три месяца), ни временная засуха (может терять более 40% массы), ни длительная голодовка (при малых положительных температурах способен обходиться без пищи около двух лет).

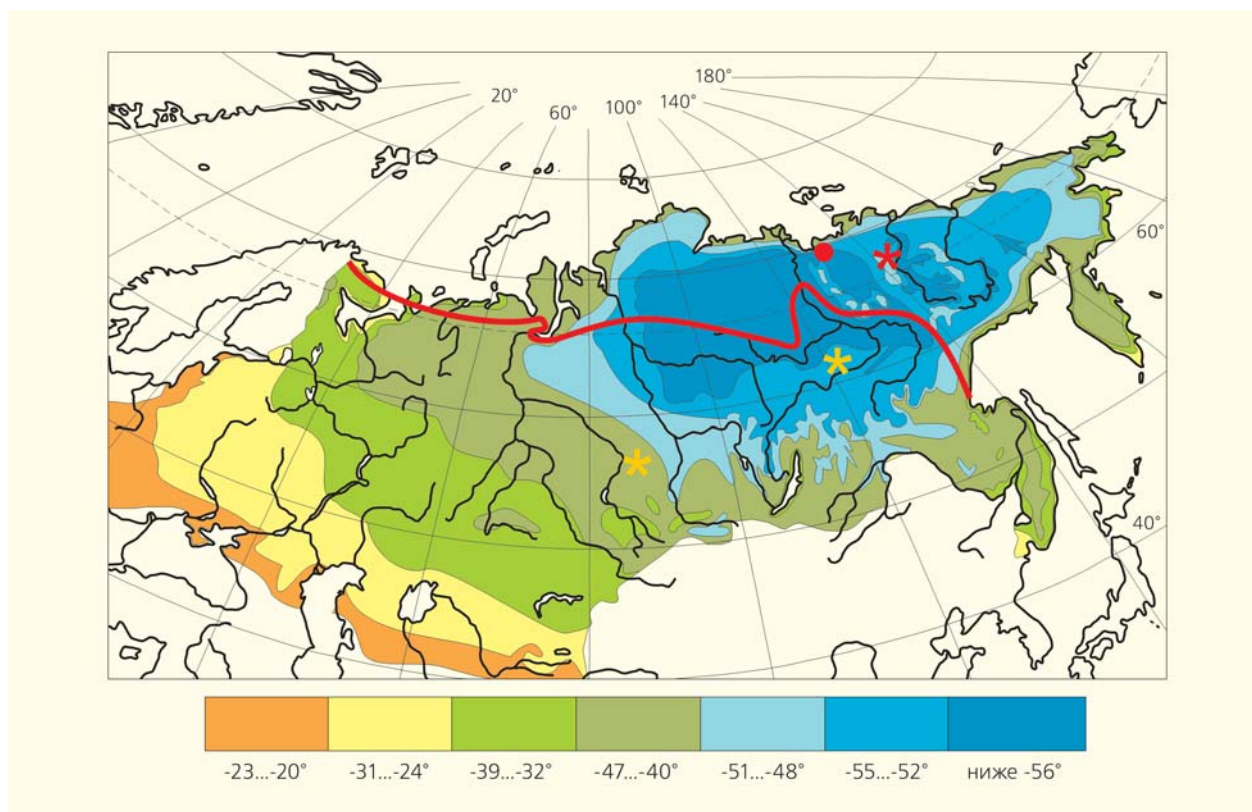
* Подробнее см.: Берман ДИ. Идеальный приспособленец, или Адаптивная стратегия сибирского углозуба // Природа. 2002. №10. С.59–68; Берман ДИ., Алфимов А.В. Не холодно ли углозубу на вечной мерзлоте? // Природа. 2012. №3. С.34–45.

Еще один пример земноводных-экстремалов — сибирская лягушка (*Rana amurensis*), занимающая громадные и холодные пространства от Урала до бассейнов рек Охотского моря (Охота, Тауй, Яма). Она проникает за полярный круг вплоть до 71° с.ш. (не такой уж и север, если речь идет, например, о Скандинавии, но Заполярье Сибири — это серьезный север)! Между тем с сибирской лягушкой нас ждет разочарование. Она не героиня пространства, занятого зимой ледяным сибирским антициклоном, так как осваивает его «хитростью»: зимует в непромерзающих водоемах, а значит, хоть и при малых, но положительных температурах. Просто и эффективно.

Вот другой вид лягушек достоин истинного восхищения. Это — североамериканская лесная лягушка (*Lithobates sylvaticus*), тоже с очень широким ареалом, тоже выходит в область вечной мерзлоты, но зимует на суше, так как способна промерзнуть и, как стало известно в последнее время, зимовать при температурах порядка –16°С [1].

Есть и немногочисленные пресмыкающиеся, рискнувшие освоить холодные регионы. Первая среди первых, наиболее распространенная в Евразии, — живородящая ящерица (*Zootoca vivipara*). Она обитает почти по всей зоне бореальных лесов, на юге встречается в лесостепях, на севере выходит в южные тундры, а в горы поднимается почти до 3000 м над ур. м. Значительная часть ареала ящерицы восточнее Енисея лежит в зоне вечной мерзлоты, причем в его весьма холодной части: от верховьев Лены и Вилюя до Алдана ящерица обычна. Наиболее северная ее находка в Якутии — пос. Хай-ыр (70°48' с.ш., Нижне-Янский улус), самая восточная в ареале — у пос. Абый (145°04' в.д., Абыйский улус) [2]. Справедливо считается, что возможности пресмыкающегося не очень-то совместимы с подобными регионами, они — обитатели если не жарких, то уж во всяком случае не ледяных стран.

Северные границы распространения других пресмыкающихся в Евразии и близко не подходят к рубежам, достигнутым живородящей ящерицей. Так, обыкновенная гадюка нигде не проникает в область вечной мерзлоты, поскольку, вероятно, не переносит неизбежного тут замораживания. Для точности заметим, что неспособность гадюки выдерживать замерзание никто экспериментально не проверял, и это представление родилось из сопоставления обилия змей и жесткости зимы. Логика примерно такая: много непромерзающих мест для зимовки — много гадюки (как в болотах Пolesья и Мещеры или на побережьях крупных озер Северо-Запада). В регионах с суровой зимой известен феномен массовых зимовок змей, собирающихся с больших территорий в особых местах («Змеиная гора», «Змеиный лог» и т.п.). Обыкновенный уж и прыткая ящерица, хотя и встречаются в Европе даже на юге Фенноскандии, в Азии постепенно смещаются к югу, границы их ареалов «выклиниваются» в Забайкалье до 49–50° с.ш. Ограни-



Северная граница распространения живородящей ящерицы в России (красная линия) на фоне средних из абсолютных минимумов температуры воздуха [3]. Красные значки севернее границы распространения — места обнаружения ящерицы за пределами основного ареала, звездочки — места работы (окрестности Томска, Олекминска и Абыя).

живает ли их распространение на север малая холодоустойчивость животных или недостаток летнего тепла для развития яиц, предстоит выяснить.

Таким образом, живородящая ящерица обладает какими-то адаптивными свойствами, позволяющими ей чувствовать себя свободно на обширной территории, на большей части которой зимы очень суровы. Когда смотришь на карту ареала вида, создается впечатление, что ему безразлична вся эта суровость, выраженная в температуре воздуха зимой, присутствии вечной мерзлоты и т.д. Европейские коллеги, изучавшие условия зимовки этой ящерицы во Французских Альпах, писали, что зима на Юрском хребте на высоте 850 м над ур. м. очень суровая [5]. Минимальная температура воздуха здесь в годы наблюдений не опускалась ниже -15°C , а мощность снежного



Северные границы ареалов живородящей ящерицы и обыкновенной гадюки (по литературным, опросным и нашим данным) на фоне сплошного (темная заливка) и прерывистого (светлая заливка) распространения вечной мерзлоты [4]. Живородящая ящерица — единственное пресмыкающееся, живущее в области сплошной мерзлоты. Второй наиболее северный представитель этого класса в Палеарктике — обыкновенная гадюка. Она проникает в Якутию по долине Лены, но лишь в южную ее часть, и, судя по всему, только туда, где есть скальные массивы в пойме. Здесь «корни» скал, в которых зимуют змеи, находятся в таликовых зонах — территориях, не промерзающих зимой за счет «подогрева» водами реки.

покрова достигала 1 м. Все, как известно, относительно, но под метровой толщиной снега холодно (в известном смысле) не бывает. Вот в Якутске температурами $-40...-50^{\circ}\text{C}$ зимой никого не удивить, да и мощность снега здесь всего-то 25–30 см. Это правда холодно — не только ящерице и человеку, но даже деревьям и земле: иногда они трескаются от мороза!

Зимние температуры могут быть безразличны организмам, обладающим крайне высокой холодоустойчивостью. Таковы, например, на северо-востоке Азии дождевой червь *Eisenia nordenskioldi*, выдерживающий около -35°C , или способный переносить -55°C сибирский углозуб. Однако немногочисленные исследования живородящей ящерицы в этом плане, напротив, говорят о небольшой ее толерантности: и в Альпах, и под Москвой она переносит не более $-2.5...-4^{\circ}\text{C}$ [5–7]. С такими возможностями, казалось бы, не только Якутию, но и Европейскую Россию не покорить.

Впрочем, в кружеве биотопов зимой всегда существуют особенно благоприятные места. Тепло под снежными надувами, возникающими из года в год на одних и тех же местах в ветровой тени. Например, в верховьях Колымы общий фон минимальных температур поверхностных горизонтов почвы (10–15 см) на покрытых снегом участках не бывает выше примерно -15°C , под надувами же может быть лишь около -9°C . Другого рода теплые места — таликовые зоны (участки речных террас, где сезонное промерзание не достигает вечномерзлых горизонтов за счет «подогрева» текучими водами). Кто знает, может быть, живородящая ящерица приурочена на севере к подобным температурным аномалиям? Парадокс в том-то и состоит, что описания естественных зимовочных убежищ самой обычной, порой многочисленной и хорошо изученной ящерицы единичны [8, 9]. А большая часть работ, в том числе определители, уверенно отсылают читателя к трухлявой древесине, в которой ни одной достоверной находки не описано, и к антропогенным местообитаниям. Так обстоит дело не только с зимовкой ящерицы. Например, едва ли не первое место среди описаний документированных находок жаб займут... подвалы, погреба да всякого сорта ямы с влажными листьями. И это понятно: в природе искать зимующих гадов весьма сложно.

Словом, до настоящего времени оставалось неясным, что позволило наиболее распространенной и самой северной в мире ящерице освоить громадные территории, включающие в том числе и очень холодные регионы Евразии. Понять это можно, непременно ответив по крайней мере на три группы вопросов: во-первых, о ее устойчивости к низким отрицательным температурам; во-вторых, о биотопах, местах и глубине расположения зимовочных убежищ и, в-третьих, и это главное — о температурах зимовки.

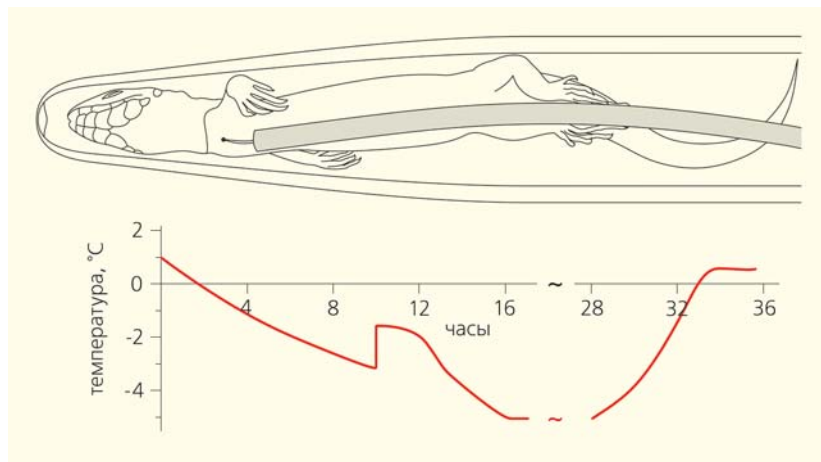
О холодоустойчивости ящерицы

Забота исследователя, изучающего экофизиологические возможности животного в лаборатории, — обеспечить максимально комфортную обстановку, разумеется, с точки зрения не экспериментатора, а самого животного. А они часто не совпадают. Чтобы этого избежать, надо оценить (путем измерения) условия обитания в природе, а затем воссоздать их в лаборатории. При исследовании холодоустойчивости крайне важно соблюсти естественную фенологию (например, не изучать зимние феномены летом), выдерживать в эксперименте скорости охлаждения (и нагревания тоже), наблюдаемые в естественных местообитаниях на глубине вероятной зимовки, и т.д. Очень важно предварительно выяснить, какой тип физико-химической стратегии переживания холода использует животное: может ли оно переносить замерзание или способно переохлаждаться (т.е. находиться в незамерзшем — с переохлажденными жидкостями тела — состоянии при температурах ниже 0°C). От этого тоже зависит выбор скоростей и режимов охлаждения и последующего нагревания в эксперименте.

Названные параметры среды мы изучали на юго-востоке Западной Сибири, где зимы суровы, а ящерица между тем многочисленна. Здесь же были отловлены животные для экспериментов, поскольку на многих северных территориях живородящая ящерица, хотя порой и нередка, включена тем не менее в региональные Красные книги как находящийся на границах ареала вид.

Способность к переохлаждению у мелких животных, в том числе у ящериц, определяется с помощью несложного устройства, фиксирующего выделение тепла кристаллизации в момент замерзания жидкостей организма. Пределы холодоустойчивости можно выяснить в низкотемпературных камерах, в которых объекты с заданной скоростью охлаждают до заданных значений, поместив их предварительно в контейнеры с землей и растительной трухой, имитирующих обстановку зимовки в природе [10].

Наша ящерица оказалась «капризной». Часть особей превращались в ледышку уже при малых отрицательных температурах (около -1°C). Другие — при тех же самых условиях содержания и режимах акклимации оставались переохлажденными вплоть до $-3...-4^{\circ}\text{C}$, затем «скачком» замерзали, и выживали при дальнейшем понижении температур. Оказалось, что порог длительно (не менее 36 ч) переносимых живородящей ящерицей температур лежит между -10 и -12°C . Это немного по сравнению с абсолютным рекордсменом среди позвоночных — сибирским углозубом, который замерзает также при $-3...-5^{\circ}\text{C}$, однако выживает, напомним, после пребывания при температуре -55°C [11]! Но от живородящей ящерицы ждать столь значительной резистентности не приходится: ее холодовая защита



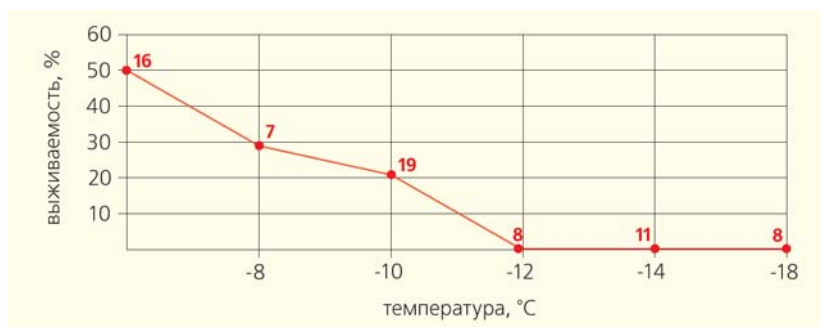
Измерение температуры образования льда в теле ящериц: слева — термopapa с усилителем, справа — ящерица в пробирке с термopарой и график переохлаждения [10]. Резкий подъем температуры на графике — выброс тепла за счет одномоментной кристаллизации переохлажденных жидкостей организма.

строится не на глицерине (весьма редком у позвоночных животных), как у углозуба, а на ином криопротекторе — глюкозе.

Почему одни особи замерзают еще при температурах около -1°C и погибают, другие — переохлаждаются до -3°C и выдерживают последующее охлаждение, от каких условий зависят роковые последствия — пока, к сожалению, неясно. Доля погибших животных в эксперименте, даже при не очень низких температурах (порядка $-6...-8^{\circ}\text{C}$), оказалась явно большей, чем можно предполагать для природных ситуаций.

Вопреки «капризности» живородящая ящерица переносит повторное замораживание (до -8°C). Это свидетельствует и о ее весьма значительной холодоустойчивости, и о правильности выбранных условий экспериментов — скоростей охлаждения, влажности субстрата и т.д. Ирония ситуации в том, что успешные эксперименты по замораживанию ничем не отличались от прочих, в которых ящерицы не выживали. Правильная схема работы, вероятно, нащупана, или мы близки к ней, но какой-то «мелочи» не учитываем, не придаем ей должного значения, что-то делаем не так...

Однако полученный порог -10°C для животных с юга Запад-



Порог переносимых живородящей ящерицей температур лежит между -10 и -12°C . Цифры у точек — размеры выборок.



Типичная свернутая поза зимующих ящериц в лабораторных холодильных термостатах. Успешно перенесшая охлаждение до -8°C особь (слева), которая вот-вот очнется, и перевернутая на спину погибшая при этой же температуре, о чем свидетельствует ее сохранившаяся яркая голубая окраска. Некоторая синюшность есть и у благополучно зимующих ящериц, но она проходит при пробуждении.

ной Сибири — это не -2.5 и не -4°C , установленные для подмосковной и западноевропейских популяций [5–7]. Тут-то и скажут нам, что сибирская живородящая ящерица может быть в генетическом отношении иная, чем изучавшиеся ранее. Нет, не иная: и подмосковные, и томские ящерицы генетически тождественны [12].

Где зимуют ящерицы

Главная особенность экологии живородящей ящерицы — не оставлять следов в литературе о местах зимовки в природе. Строго говоря, существует лишь одно подробное описание их расположения не в антропогенной обстановке, на которое можно положиться, — в публикации Е.Н.Тепловой по Печеро-Ильичскому заповеднику [8]. Известны также четыре кратких сообщения, но с детальными характеристиками конкретных мест зимовки в естественных биотопах. Описанные случаи обнаружения ящериц на огородах, пашнях, свалках, в погребках и т.д. мало что добавляют.

Таким образом, вид обычен, хорошо известен зоологам и просто сельским жителям, во многих регионах достигает высокой численности, однако поздней осенью животных находят крайне редко... Почему? Вероятно, потому что зимуют ящерицы не на поверхности почвы, не вблизи ее (случайно не наткнешься) и не в трухлявых пеньках и прочей подобной древесине, в которых многие зоологи не прочь покопаться в поисках всякой живности. Специально же никто не искал, справедливо полагая, что перекапывать лес, не имея каких-либо ориентиров, — дело не только нелегкое, но и дурное.

И все-таки пути целенаправленных поисков зимующих ящериц существуют. Их, очевидно, проще найти там, где они многочисленны. Идеальное место — все тот же юго-восток Западной Сибири: регион с суровыми зимами и с высокой численностью ящерицы.

Поиски мест зимовки ящериц в окрестностях Томска проходили в несколько этапов. Во-первых, на участке их постоянного обитания — просеке ЛЭП, проложенной по сосновому бору, поздней осенью 2009 г. был проведен тотальный и тщательный осмотр площадки (около 1000 м^2), на которой летом ящерицы встречаются особенно часто. Однако надежда обнаружить животных, зимующих на поверхности — под опадом, в дернине, в трухлявых бревнах или в укрытиях разного рода, как это описано в литературе, не оправдалась — ни в одном из перечисленных мест ящериц не оказалось.

Во-вторых, следующей весной на этом участке тщательно отслеживали сход снега и момент появления ящериц. Первые животные вышли на поверхность небольших проталин в конце апреля, когда кругом еще лежал снег глубиной в 25–50 см.

На одной из них, на окраине луга с редкой порослью осины и сосны, площадью примерно в 30 м^2 , были встречены семь взрослых самцов. Ни коряг, ни пней, ни валежника, ни других убежищ, в которых ящерицы могли бы зимовать, на этой проталине не было. Максимальная глубина оттаивания грунта, измеренная металлическим щупом, была здесь не больше 15 см, а на вытянувшем участке песчаного вала вдоль проходящей рядом еще покрытой снегом дороги — до 30 см. «Обстоятельства места и времени» позволили предположить, что животные зимовали именно на названных глубинах в почве на освободившихся от снега участках.

Для проверки предположения следующей осенью, в октябре, когда ящерицы уже долгое время не встречаются на поверхности, обширный участок их постоянного обитания был вновь тщательно обследован. Как и в предыдущем году, ящериц не оказалось ни на поверхности почвы под опадом, ни во мху, ни в многочисленных вероятных укрытиях. Тогда в ход пошла лопата, и около 65 м^2 было вскопано на глубину 30 см. Почвенный профиль здесь немудрен: незначительной мощности (1–3 см) подстилка, гумусовый горизонт (3–10 см), постепенно переходящий в светлую супесь (материнскую породу). В результате именно на небольшом пятнышке, где весной на проталине были встречены первые ящерицы, в почве обнаружено восемь зимующих взрослых самцов! Еще две неполовозрелые особи были найдены в других частях участка. Почти все животные располагались поодиночке на расстоянии до 3 м друг от друга на глубине от 5 до 13 см.

Половина найденных ящериц использовала для зимовки старые норы массового на этой территории жука-навозника (*Anoplotrupes stercorosus*). Его норы представляют собой почти вертикальные ходы диаметром не более 1.5 см и длиной до 30 см. Ящерицы располагались в них в 5–10 см от поверхности почвы головой вверх, т.е., несмотря на узость хода, все они каким-то образом разворачивались в норке и, более того, стремились свернуться: хвост обернут вокруг его основания или вокруг туловища.

Две ящерицы обнаружены в конце истлевшего корня березки, диаметром также менее 1.5 см, на глубине около 13 см. Две другие были найдены в узких щелях почвы вдоль корней молодых деревьев на глубине 7–10 см. Еще одна — в дернине из куртины мха, брусники и осок на глубине 7–8 см.

Большая часть ящериц находилась в плотной почве на нижней границе гумусового горизонта или в супеси сразу под ним; три — в полостях на участках с относительно рыхлой почвой. Во время раскопок средняя влажность почвы в местах зимовки была лишь 15%, а ее температура — 4.1 – 6.1°C .

Найденные нами места зимовки ящериц в Западной Сибири объединяют несколько общих черт.

Во-первых, все без исключения животные находились в разного рода хорошо сформированных полостях: в норах жуков, в выгнивших корнях и т.п. На участке с сыпучим грунтом, не скрепленным корнями растений, ящерицы не обнаружены.

Вторая их характерная черта — незначительная влажность субстрата. Между тем живородящая ящерица, как известно, во многих частях ареала тесно связана с увлажненными и даже болотными биотопами. Она прекрасно плавает, ныряет в случае опасности, может подолгу не всплывать... В Мещерских болотах, и поэтично, и весьма точно описанных К.Паустовским, весной всегда можно видеть, как ящерицы греются или охотятся на не скрепленных между собой жердях легких пешеходных гатей, которые проложены по особо топким местам. Когда наступаешь на эти зыбкие, по существу — плавающие, «дорожки», вспугнутые ящерицы прыгают в воду и хватаются за притопленную жердь. Как только переходишь на следующую жердь, предыдущая всплывает вместе с державшимися за нее ящерицами.

Под Томском ящерица на влажных участках болот летом обычна, но зимует ли она здесь (как и в подобных биотопах других регионов) или уходит на более сухие места, неясно. Французские коллеги отметили, что в сухих зимовочных убежищах ящерица замерзает при -4°C , в то время как во влажных кристаллы льда, образующиеся на покровах, провоцируют замерзание животного уже при -2°C [7]. Быть может, зимовка во влажных условиях возможна лишь в регионах с положительными температурами убежищ или с незначительной продолжительностью периода малых отрицательных температур. В наших экспериментах при температурах около -1°C все животные в субстрате влажностью 70–80% погибли в течение всего лишь 12 ч.

Третья общая черта обнаруженных зимовочных убежищ ящериц на юго-востоке Западной Сибири — их небольшая глубина (в среднем 8–10 см). В совокупности с предыдущими находками в природе и в антропогенных местообитаниях с известной осторожностью можно говорить о таком расположении мест зимовки как о стереотипе. Есть лаконичные указания о находках зимовок ящериц в некоторых регионах Сибири на значительной глубине (40–50 см), однако подробных описаний



Норки майского жука (слева) и жука-навозника. Большинство ящериц, найденных поздней осенью при раскопках в окрестностях Томска на просеке в сосновом бору, находились в пустых норках жуков-навозников. Вертикальные ходы этих обычных обитателей легких супесчаных грунтов идут до 25–30 см, однако ящерицы не встречены глубже 13 см. Здесь же нередки ходы личинок майских жуков, всегда горизонтальные и расположенные в первых 5–15 см. Одним словом, готовых убежищ для зимовки ящериц достаточно.



этих убежищ не приводится, что делает невозможным их интерпретацию.

Ряд авторов сообщают о возможности зимовки ящериц в норах различных позвоночных животных [2, 13]. Между тем этот тип зимовочных убежищ для ящериц может быть небезопасен: известен случай их пожирания, вероятно, полевыми [9].

Особый тип зимовки ящериц — на поверхности почвы, описанный в некоторых работах. На дачном участке в пос. Зеленоградском (Подмосковье) в ноябре 1975 г. под куском лежашей на земле старой клеенки были обнаружены 14 ящериц, каждая из которых находилась в отдельной ямке [6]. Большинство животных выжили — вероятно, из-за того, что место зимовки располагалось на участке, где ранее хранился торф, и поэтому грунт не промерзал.

В западной части Франции, на биологической станции в Пемпоне (Бретань), на огороженном участке торфяного болота, куда были выпущены ящерицы для изучения мест локализации их на зимовке, только четыре особи располагались на глубине 10 см, тогда как остальные 13 — под лесной подстилкой, во мху, под полегшей травой и внутри кустов злаков [13].



Местообитания ящериц в окрестностях г.Олекминска. На глубине 10–12 см, под переплетением корней, заполненным растительным опадом, находится плотный тяжелый суглинок. На фото он выглядит безобидным «песочком», на самом деле — нелегко поддается лопате, в него не проникают корни трав и кустарников, нет беспозвоночных животных, не встречены норы грызунов. Очевидно, что суглинок непригоден и для ящериц.

Опираясь на эти случаи, можно предположить, что пережить зиму на поверхности, вероятно, принципиально возможно при удачно складывающихся температурных условиях (ранние и обильные снега, аномально теплая зима и т.д.). Однако если бы такая зимовка была широко распространена, то зоологи, особенно энтомологи, в поисках интересных и легко добываемых насекомых часто находили бы ящериц в подобной обстановке. Но не находят...

Нам повезло — 15 сентября 2010 г. в окрестностях г.Олекминска, на старой свалке в лесу, под раздавленной коробкой из гофрированного картона, были обнаружены три едва шевелившиеся при прикосновении к ним ящерицы. Они лежали, свернувшись кольцами, в индивидуальных ямках, которые по глубине лишь немного превосходили толщину ящериц, а по площади были больше свернувшихся животных. Их присутствие на поверхности поздней осенью можно рассматривать как вынужденное. В солнечную погоду пространство под картоном быстро прогревается и поздней осенью может привлекать рептилий теплом или как временное укрытие. Однако подобные убежища — губительная ловушка: в первый же пасмурный день ящерицы не будут разогреты и останутся здесь на «принудительную» зимовку. Температурные же условия зимой на поверхности почвы, конечно же, много жестче, чем в приповерхностных горизонтах.



Разрушенные строения — излюбленные местообитания живородящей ящерицы в лесной зоне. Как и на малопосещаемых задворках усадеб, свалках и т.д., тут много укрытий, мест для обогрева, высокая численность беспозвоночных, привлекающая ящериц. Справа — одна из трех ящериц, которые улеглись на зимовку под картоном на старой свалке в окрестности Олекминска и были обнаружены еще при высокой дневной температуре (около 10°C), но уже «дремлющими» (неподвижными, с закрытыми глазами). После обнаружения ящерицы изменили позу: слегка «раскрутились». Хорошо видно «натопанное» углубление — убежище использовалось явно многократно. Если исходить из холодоустойчивости, которой обладает вид в окрестностях Томска (–10°C), ящерица на фотографии зиму не переживет.

Температурные условия зимовки

В районах даже с обильными снегами зимовка ящериц на небольшой глубине чревата низкими минимальными температурами не столько зимой, когда земля «утеплена» снежным покровом, сколько поздней осенью, особенно в конце ноября. Оказалось, что на юго-востоке Западно-Сибирской равнины, известной, как и вся Сибирь, своими морозами, зима для живородящей ящерицы не только не катастрофичное, но даже не напряженное время. Установленные в 20 биотопах на разных глубинах автономные самопишущие термометры показали, что минимальные температуры почвы на глубине 10 см в подавляющем большинстве случаев были весьма далеки от критических для ящериц. Они лежали выше -5°C , и лишь в некоторых биотопах опускались ниже $-8...-10^{\circ}\text{C}$. Таким образом, зимовка для ящерицы в средний по погодным условиям год на юго-востоке Западной Сибири вполне комфортна.

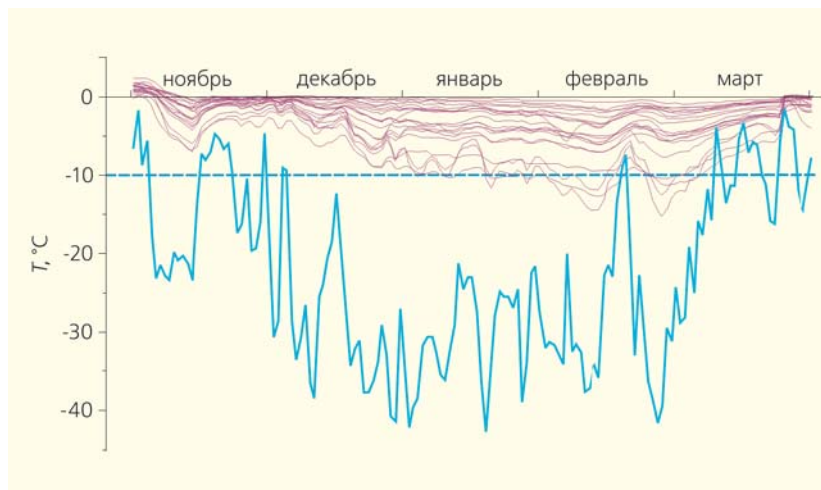
Однако Якутия — не Западная Сибирь. Зимой здесь формируется, как известно, устойчивый якутский отрог Сибирского антициклона, который и определяет крайне низкие температуры воздуха в регионе в течение почти всей зимы. И снега на значительной части Якутии существенно меньше по сравнению с Западной Сибирью (табл.). А это означает, что почвы, особенно их приповерхностные горизонты, неизбежно сильно выхолаживаются.

Понятно, что ящерица здесь не может быть столь же благополучной. Ее распространение в Якутии своеобразно [14, 15]. К западу от Лены она занимает бассейны левых притоков, в том числе и Вилюя; по Лене продвигается еще севернее. К востоку от Верхоянского хребта ящерица известна лишь из двух точек — окрестностей упомянутых поселков Хайыр и Абый.

В южной половине Якутии (кроме Лена-Алданского междуречья) минимальные температуры на глубине 20 см зимой высо-

ки: в окрестностях Олекминска в почвах почти так же тепло, как в почвах окрестностей Томска. Основная причина состоит в том, что Олекминск расположен в полосе перехода от территорий с прерывистой мерзлотой к области ее сплошного распространения. Более того, здесь встречаются талики — участки, обогреваемые зимой незамерзающими и близко к поверхности находящимися подземными водами. Это и прирусловой сток рек, и выходы глубинных вод к поверхности (всякого рода родники), и непромерзающие озера. Вода обогревает грунты даже при якутских морозах и небольших снегах. Под Олекминском при среднем снежном покрове в январе в 27 см на одном из поселений живородящей ящерицы наши логгеры на глубине 10 см показали минимальную за зиму температуру всего лишь в -4°C ! Но и в других местах установки логгеров условия для ящерицы были неплохи. Благодаря расположению в переходной области и обилию подземных вод в юго-западной части Якутии, как и на юго-востоке Западной Сибири, зимовка для живородящей ящерицы — отнюдь не узкое место.

Да что там ящерица! На притоках верховий Вилюя в суровейших зимних условиях живет, вероятно, не впадающий в спячку и известный своей про-



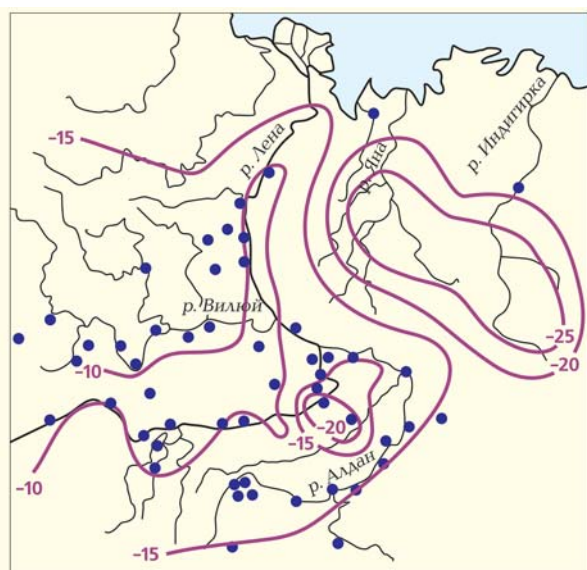
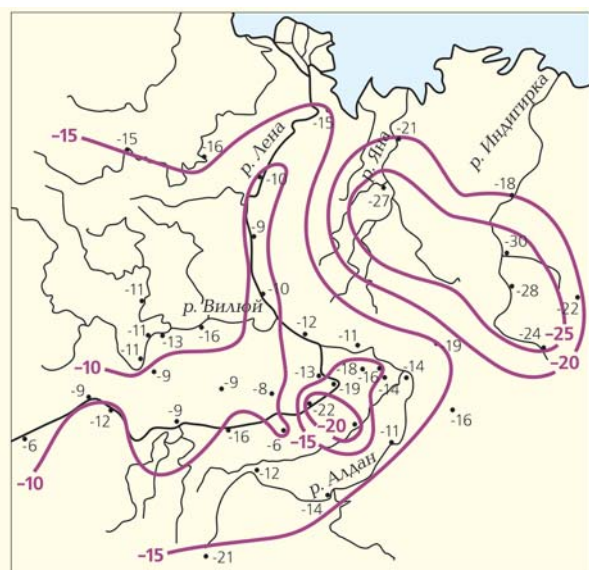
Минимальные температуры почвы на глубине 10 см в 20 биотопах на юго-востоке Западной Сибири (окрестности с.Подгорное, Томская обл.) зимой 2009–2010 гг. Они лишь в нескольких случаях опускаются ниже -10°C — пороговых для живородящей ящерицы. Синяя кривая — минимальная температура воздуха.

Таблица

Температуры воздуха и мощность снежного покрова в январе в упоминаемых в статье пунктах

Параметр	Москва	Томск	Алдан	Олекминск	Абый	Якутск
Средняя температура, °C	-6.5	-19.2	-27.8	-30.7	-41.9	-43.2
Средний минимум, °C	-9.1	-23.4	-31.8	-34.6	-45.4	-47.1
Средняя высота снега, см	25	41	50	27	35	25

Данные взяты из: Справочник по климату СССР. Вып. 8. Ч.4; Вып.20. Ч.2; Вып.20. Ч.4; Вып.24. Ч.2; Вып. 24. Ч.4. Л., 1965–1968.



Средняя многолетняя температура почвы на глубине 20 см в самый холодный месяц [15, 16] и распространение живородящей ящерицы в Якутии (синие кружки) [2]. Слева показаны температуры, по которым построены изотермы; отчетливо видно, что почвы южной и юго-западной областей Якутии, а также бассейна Вилюя и долины Лены в среднем течении теплее почв северо-восточной части Якутии. Это обстоятельство сказывается на картине распространения ящерицы (справа).

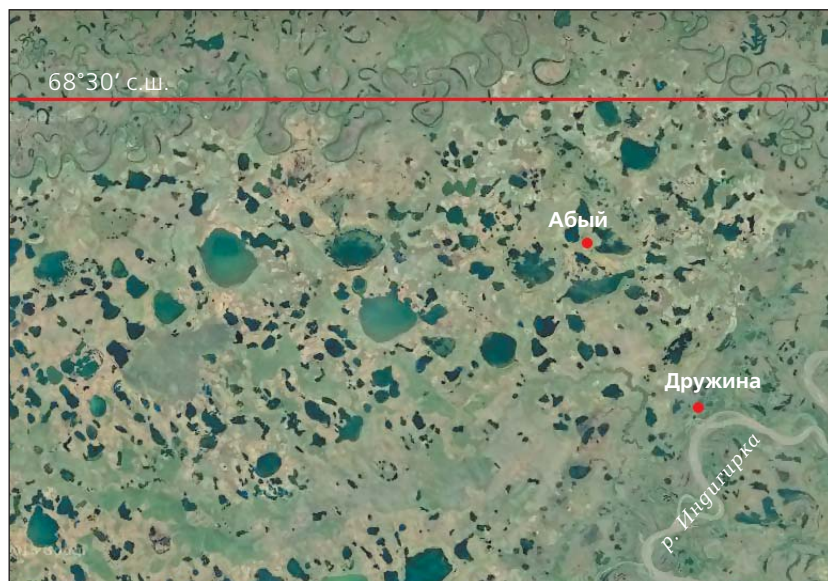
жорливостью крот *Talpa altaica* [16]. Надо ли объяснять, что существование кротов (питающихся зимой преимущественно дождевыми червями) в подобной обстановке удивительно и связано с обитанием в неглубоко промерзающих почвах, что возможно исключительно в таликовых зонах?

Иная ситуация на северо-востоке Якутии — здесь люто холодно даже по сравнению с ее западной частью. Минимальные за зиму температуры почвы на глубине 20 см в бассейнах Яны и Индигирки вдвое ниже, чем в междуречье Лены и Вилюя. Причины тому очевидны: здесь холоднее в воздухе, а снега примерно столько же. Как же ящерицы умудряются там жить?

В коллекциях Зоологического института РАН хранится ящерица, пойманная в окрестностях пос. Абый (примерно в 70 км от пос. Белая Гора на Индигирке, что под 69° с.ш.) в 1982 г. сотрудником тогда еще Биологического института Якутского филиала СО АН СССР, ныне покойным Г.Т.Белимовым. Одна! Других сборов отсюда нет.

Увы, нам не повезло — несмотря на тщательные поиски в окрестностях поселка, ящерицу мы не нашли. Однако выяснили многое, проливающее свет на условия ее существования здесь. В Абые средняя январская температура воздуха почти -42°C при 257 мм годовых осадков (в Ашхабаде 201 мм!). Иными словами, по сравнению с Олекминском январь здесь на 10°C холоднее, а высота снежного покрова больше всего на 8 см. Поэтому, если

Восточная часть Абыйской низменности на карте. Бесчисленные термокарстовые озера — результат протаивания полигональной сети ледовых жил, расчленившей равнину в плейстоцене. Многие озера не промерзают; под ними и вдоль берегов сохраняются талые, а потому теплые зоны. Талики, по-видимому, особенно велики и стабильны на полуостровах и перемычках между крупными озерами. Это наиболее перспективные места для обитания ящериц.



Восточная часть Абыйской низменности на карте. Бесчисленные термокарстовые озера — результат протаивания полигональной сети ледовых жил, расчленившей равнину в плейстоцене. Многие озера не промерзают; под ними и вдоль берегов сохраняются талые, а потому теплые зоны. Талики, по-видимому, особенно велики и стабильны на полуостровах и перемычках между крупными озерами. Это наиболее перспективные места для обитания ящериц.

в окрестностях Олекминска ящерица обычна, в Абые ее быть-то и не должно! Но ведь была! Более того, местные жители хорошо знают ее, уверенно отличают от обитающего здесь в массе и повсеместно сибирского углозуба, указали места, где 20–30 лет назад ящерица встречалась. В окрестностях Абыя нет большой реки, таликовая зона которой «отепляла» бы грунты. Зато поселок лежит на Абыйской низменности с массой неглубоких термокарстовых озер, занимающих едва ли не четверть (может, и треть) всей территории! Лишь некоторая их часть зимой промерзает. В 90-х годах прошлого века сотрудники Института мерзлотоведения (г.Якутск) измерили зимние температуры грунтов на Абыйской низменности и показали широкое развитие таликов под озерами. Их отепляющее влияние сказывается и на берегах водоемов.

Видимо, такая же ситуация складывается и в окрестностях упомянутого в начале статьи пос.Хайыр. Как и Абый, он расположен на краю равнины с массой термокарстовых озер и, конечно же, с их неизменными спутниками — подозерными таликами. Заметим, что водохранилище Вилюйской ГЭС, имеющее большую протяженность береговой линии за счет заполнения долин многих притоков, может значительно расширить территорию обитания ящерицы на северном пределе ее распространения в северо-западных областях Якутии благодаря отеплению грунтов. Пространства без таликов непроницаемы для живородящей ящерицы: в первую же зиму расселяющиеся животные погибнут. Значит, ареал вида на северо-востоке Якутии не

может быть сплошным, он состоит из обособленных популяций, между которыми ныне нет обмена. Их происхождение явно остаточное, вероятно, со времен голоценового максимума (6–5 тыс. лет назад), а может быть, они много древнее.

Причины неуспеха в поисках ящерицы в окрестностях пос. Абый могут быть связаны с резким падением ее численности в предшествующие десятилетия, подобно тому как это наблюдалось на Алдане. Известно, что численность ящерицы в Якутии к концу 70-х — началу 80-х годов заметно сократилась в ряде районов [2]. Так, в окрестностях г.Алдана в 1960 г. на 1 га насчитывалось до 70 особей, а в 1975 г. они не были найдены здесь вовсе. Авторы этих сообщений считают причиной сокращения популяций деятельность человека. Однако хорошо известно, что численность живородящей ящерицы на свалках и в других местах близ поселков, как правило, бо́льшая, чем в природных, что связано с лучшими защитными и кормовыми условиями. Материалы наблюдений на метеостанциях Олекминск, Амга, Томмот, репрезентативных для указанных районов, позволяют уверенно предполагать, что уменьшение численности ящерицы в конце 60-х годов связано не с антропогенным прессом, а с долговременными флуктуациями климата [17].

Весьма вероятно, что аналогичный коллапс мог затронуть и популяцию Абыйской озерной равнины. Не исключено, что падение численности здесь необратимо и знаменует собой очередной этап сокращения ареала живородящей ящерицы в Якутии от голоценового максимума к нашим дням.



Восточная часть Абыйской низменности с самолета. Рано или поздно ледовые перемычки между термокарстовыми озерами тают, и водоемы сливаются. Такая же судьба ждет перемычки, которые отделяют озера от протоков, впадающих в реки. Тогда озеро стремительно мелеет, а затем и вовсе исчезает, дно зарастает травами и кустарниками. Талик под ним сохраняется несколько лет, а затем, не поддерживаемый теплом воды, «вымерзает».



Сбитые пастбища с зловонным сорняком — гривастым ячменем (вверху), сенокосы с житняком и тимopheевкой. Все это — на недавнем дне спущенного озера. Талик уже «вымерз», и минимальные температуры даже на глубине 20 см стали ниже пороговых для ящерицы -10°C . Окрестности пос.Абый.

* * *

Предположение о выдающейся холодоустойчивости живородящей ящерицы в Сибири, позволяющей ей, подобно сибирскому углозубу, зимовать при экстремально низких температурах, подтвердилось лишь отчасти. Переносимые ящерицей из популяций Западной Сибири отрицательные температуры (-10°C) оказались в 2.5 раза ниже, чем у ящериц из Европы. Это, конечно, далеко не рекордные -55°C , но и -10°C обеспечивает ящерице благополучную зимовку вблизи поверхности почвы в Западной Сибири: в обследованных биотопах температуры на этой глубине значительно выше порога, т.е. не лимитируют распространения вида в регионе.

Выявленные эколого-физиологические возможности живородящей ящерицы, казалось бы, абсолютно не соответствуют экстремальной климатической обстановке в Якутии зимой. Но на юго-западе и, вероятно, на всей южной части Якутии в наиболее теплых зимой местообитаниях ящерицы минимальные температуры почвы близки к таковым на юго-востоке Западной Сибири ($-4.5... -7.0^{\circ}\text{C}$). Это сходство конвергентно:

низкие температуры воздуха в Якутии при тождественности режима накопления и итоговой мощности снега компенсируется в почве многих биотопов теплом незамерзающих грунтовых вод. Подобные температурные аномалии весьма обычны на юге и западе Якутии (не севернее Вилюя), в отличие от других ее частей, что и определяет широкое распространение живородящей ящерицы в этом месте региона.

Начиная работу, мы были убеждены, что живородящая ящерица в Сибири — столь же яркий феномен адаптивности к низким отрицательным температурам, как сибирский углозуб. И ошиблись. Ее холодоустойчивость невелика, и ящерица использует промежуточный адаптивный путь между углозубом и сибирской лягушкой. Углозуб благодаря выдающейся адаптации независим от температуры среды

зимой, более того, его холодоустойчивость (-55°C) избыточна — ныне в местах его зимовки не бывает настолько холодно. Сибирская лягушка, напротив, не холодоустойчива и жестко «привязана» к незамерзающим водоемам. Живородящая ящерица заселяет почти все отведенное ей физиологическими возможностями пространство, проникая по «кружеву» изотермы -10°C на север.

В заключение нельзя не подчеркнуть, что порог в -10°C — рекордная холодоустойчивость переносящих замерзание представителей всего класса, которая зарегистрирована к настоящему времени. Сама по себе эта цифра невелика, но указывает на принципиальную возможность пресмыкающихся переносить такие отрицательные температуры не только ныне, но и, самое главное, в былые криохроны. ■

Авторы признательны М.А. и Ю.С. Коробейниковым (Подгорное), Н.П. Жорняк, О.Ю. Рожковой, Н.Егоровой (Олекминск), семье Соломовых (Абый и Белая Гора) за помощь во время полевых работ.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований. Проекты 13-04-00156 и 16-04-0082.

Литература

1. Costanzo J.P., Amaral M.C.F. do, Rosendale A.J., Lee R.E. Jr. Hibernation physiology, freezing adaptation and extreme freeze tolerance in a northern population of the wood frog // J. Exp. Biol. 2013. V.216. P.3461–3473. Doi:10.1242/jeb.089342.
2. Боркин Л.Я., Белимов Г.Т., Седалищев В.Т. Новые данные о распространении амфибий и рептилий Якутии // Экология и фаунистика амфибий и рептилий СССР и сопредельных стран / Ред. Л.Я.Боркин. Л., 1984. Т.124. С.89–101.
3. Алфимов А.В. Распределение минимальных температур в поверхностном слое почвы под снегом в северной Евразии // Почвоведение. 2005. №4. С.438–445.
4. Гаврилова М.К. Современный климат и вечная мерзлота на континентах. Новосибирск, 1984.
5. Grenot C.J., Garcin L., Dao J. et al. How does the European common lizard, *Lacerta vivipara*, survive the cold of winter? // J. Comp. Biochem. Physiol. A. 2000. V.127. P.71–80. Doi:10.1016/S1095-6433(00)00236-1.
6. Васильев Б.Д., Осмоловская В.И. О зимовке живородящей ящерицы, *Lacerta vivipara*, в условиях Подмосквы // Земноводные и пресмыкающиеся Московской области. М., 1989. С.145–146.
7. Voituren Y., Heulin B., Surget-Groba Y. Comparison of the cold hardiness capacities of the oviparous and viviparous forms of *Lacerta vivipara* // J. Exp. Zool. A. 2004. V.301. P.367–373. Doi:10.1002/jez.a.20042.
8. Теплова Е.Н. Амфибии и рептилии Печоро-Ильчского заповедника // Труды Печоро-Ильчского гос. заповедника. Сыктывкар, 1957. Вып.6. С.116–129.
9. Булахова Н.А., Шамгунова Р.Р., Матковский А.В. О местах зимовки живородящей ящерицы (*Zootoca vivipara*, Reptilia, Sauria) в Западной Сибири // Зоол. журн. 2011. Т.90. №1. С.115–118.
10. Berman D.I., Bulakhova N.A., Alfimov A.V., Meshcheryakova E.N. How the most northern lizard, *Zootoca vivipara*, overwinters in Siberia // Polar Biology. 2016. Doi:10.1007/s00300-016-1916-z.
11. Берман Д.И., Мещерякова Е.Н., Булахова Н.А. Переносимые отрицательные температуры и потери массы сибирским углозубом (*Salamandrella keyserlingii*, Amphibia, Hynobiidae) // ДАН. 2016. Т.468. №5. С.589–593. Doi:10.7868/S0869565216170278.
12. Surget-Groba Y., Heulin B., Guillaume C.-P. et al. Multiple origins of viviparity, or reversal from viviparity to oviparity? The European common lizard (*Zootoca vivipara*, Lacertidae) and the evolution of parity // Biol. J. Linn. Soc. 2006. V.87. P.1–11. Doi:10.1111/j.1095-8312.2006.00552.x.
13. Grenot C., Heulin B. Emploi de radioisotope pour la localisation de *Lacerta vivipara* et l'étude de son métabolisme au cours de l'hivernage // C. R. Acad. Sci. Serie III. 1988. V.307. P.305–310.
14. Климатический справочник СССР. Вып.24. Ч.1–3, 8. Л., 1956–1963.
15. Метеорологический ежемесячник. Вып.24. Ч.2. Якутск, 1965–2008.
16. Строганов С.У. Звери Сибири. Насекомоядные. М., 1957.
17. Алфимов А.В., Берман Д.И., Булахова Н.А. Зимние температурные условия в корнеобитаемом слое почв в Сибири и на северо-востоке Азии // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2012. №3. С.10–18.

Сейсмические деформации в древнем городе Илурате

А.М.Корженков, А.Н.Овсюченко, А.С.Ларьков

Памятники истории хранят поучительные уроки прошлого. Это касается событий не только человеческой истории, но и природных явлений. За последние 250 лет Керченский п-ов на востоке Крыма не подвергался сильным землетрясениям. Однако он хранит немало свидетельств сейсмических катастроф далекого прошлого, которые запечатлены не только в молодых тектонических деформациях, но и в руинах древних городов, давно покинутых человеком. Один из них — Илурат, город-крепость I–III вв. Его название упоминается в сочинении античного географа II в. Клавдия Птолемея [1]. В отличие от большинства античных городов, Илурат расположен среди степных холмов в глубине Керченского п-ова. В те времена, когда на месте современной Керчи находилась столица Боспорского царства — Пантикапей, крепость защищала западные подступы от нападений со стороны степи и предгорий Крыма. После того как в III в. Илурат был покинут, серьезного строительства там не велось, и благодаря этому развалины очень хорошо сохранились (рис.1). Планомерные археологические раскопки здесь начались в 1947 г. В итоге многолетних исследований нескольких поколений археологов были открыты остатки мощных оборонительных стен, башен, ворот, улиц и жилых кварталов (рис.2).

© Корженков А.М., Овсюченко А.Н., Ларьков А.С., 2016



Андрей Михайлович Корженков, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией палеосейсмологии и палеогеодинамики Института физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН. Область научных интересов — палео- и археосейсмология, историческая сейсмология, структурная геоморфология, оценка сейсмической опасности.



Александр Сергеевич Ларьков, научный сотрудник того же института. Круг научных интересов охватывает сейсмотектонику, палео- и археосейсмологию, оценку сейсмической опасности.

Александр Николаевич Овсюченко, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сейсмотектоники и сейсмического микрорайонирования того же института. Специалист в области сейсмотектоники, палеосейсмологии и оценки сейсмической опасности.

Ключевые слова: Боспорское царство, Илурат, археосейсмология, сейсмогенные нарушения.

Key words: Bosporan kingdom, Ilurat, archeoseismology, seismogenic destruction.

Руины древних городов как окаменевшие сеймоскопы

Повреждения, наблюдаемые в древних руинах, могли возникнуть в результате плохой строительной технологии, выветривания каменного материала с течением времени (статическое повреждение), разрушения вражескими армиями или при землетрясениях. Распознавание сейсмической природы повреждений посредством преимущественно ориентированного обрушения строительных элементов — обычный метод, применяемый в археологии.



Рис.1. Развалины древнего Илурата на слабонаклонном плато у современного села Ивановка.

Фото А.Н.Овсяченко

Данная работа показывает потенциальное использование особенностей разрушений и повреждений, наблюдаемых в городских руинах, в качестве количественного инструмента для решения главных задач археосейсмологии:

- выявления и доказательства сейсмической природы деформаций в древних памятниках;
- локализации эпицентральных зон землетрясений методом, независимым от сейсмической сети и дополняющим ее;
- идентификации зон с сейсмически наведенной деформацией сжатия и растяжения;
- оценки местной интенсивности сейсмических колебаний;
- продления сейсмической летописи на временной интервал в тысячи лет.

Особенности сейсмических повреждений, примененные впоследствии к археологическим местам, предварительно были нами прокалиброваны при исследовании сильных Кочкор-Атинского и Суусамырского землетрясений (1992 г., Кыргызстан) [3, 4].

В Древнем Китае сейсмограф представлял собой сосуд с восемью драконами, закрепленными на его боках и обращенными в различные стороны света: на север, северо-восток, восток, юго-восток, юг, юго-запад, запад и северо-запад (рис.3). Каждый дракон держал в пасти шарик. Вслед за землетрясением монах инспектировал драконов, проверяя, какой из них уронил шарик в открытый рот лягушки внизу. Пара дракон и лягушка, обменявшиеся шариком, указывала направление на эпицентр землетрясения. Этот замечательный сейсмограф использовал простой крите-

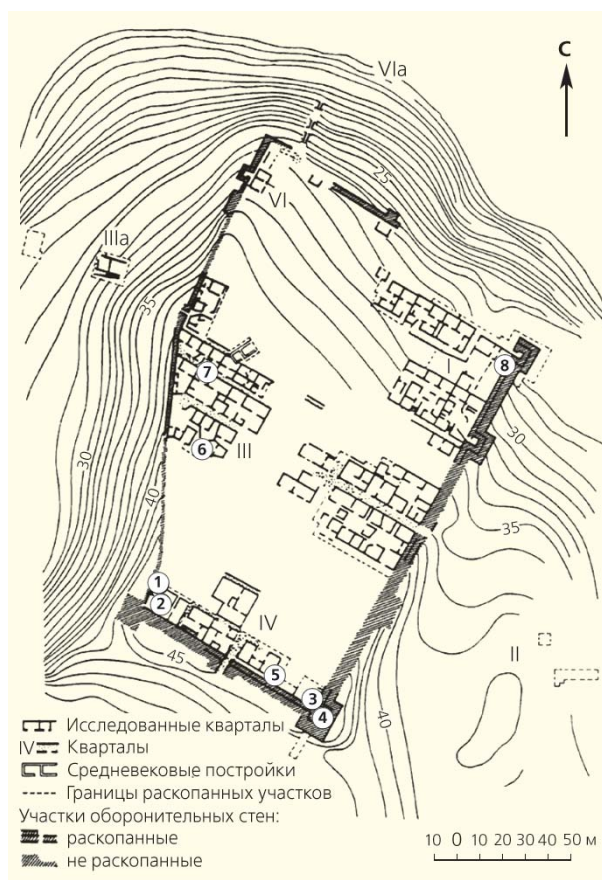


Рис.2. Вид северо-восточного склона городища Илурат ([2], с доп.). Кружками с цифрами показаны точки наших наблюдений с выявленными сейсмическими деформациями.



Рис.3. Древний китайский сейсмограф.

рий, обычно применяемый для интерпретации особенностей сейсмических разрушений.

Сейчас сейсмическая активность регистрируется сетью чувствительных приборов. Сейсмическая служба очерчивает регионы, характеризующиеся частыми событиями различной степени интенсивности, и оконтуривает районы относительного спокойствия. Имеет ли здесь силу геологическое правило «настоящее есть ключ к познанию прошлого»? В ряде случаев ответ будет отрицательным. Землетрясения связаны с реализацией тектонических напряжений и управляемы многими факторами, такими как трение между блоками горных пород, наличие больших или мелкомасштабных трещин, температура, давление и др. Сумма энергии, которую необходимо накопить для того, чтобы вызвать землетрясение, будет различаться в разных геолого-структурных обстановках. Низкий «порог землетрясений» существует в определенных регионах, где напряжение реали-

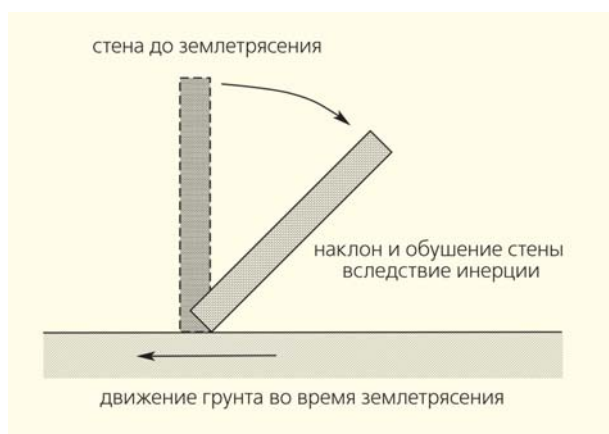


Рис.4. Схематическая модель наклона и обрушения стен, перпендикулярных направлению распространения сейсмических колебаний.

зуется в частых относительно небольших событиях или посредством продолжающегося крипа (медленного смещения по разлому). Другие регионы обладают значительно более высоким порогом землетрясений. Там длинные интервалы спокойствия прерываются редкими сейсмическими событиями высокой интенсивности, т.е. происходит одно катастрофическое землетрясение через несколько десятков или даже сотен лет. Для обнаружения таких редких, но значительных сейсмических катастроф необходимы сейсмические записи за период от нескольких сот до нескольких тысяч лет. Так, для районов строительства атомных электростанций требуется оценка повторяемости сильных землетрясений за последние 10 тыс. лет. Имеются ли в нашем распоряжении такие долгопериодные и широко распространенные записи? Есть ли у нас доступ к сейсмографам, подобным древнему китайскому? Можно ли датировать время их срабатывания?

Важность исследования исторически задокументированных землетрясений давно признана, но их изучение носит скорее качественный характер. Однако древние, хорошо сконструированные здания могут рассматриваться как окаменевшие, или «замороженные», сейсмоскопы. Раскопки помогают разгадывать события сейсмических разрушений, которые могут быть датированы археологическими находками, изредка сопровождаемыми исторической документацией. Систематическая ориентация поврежденных древних зданий позволяет создать банк данных, с помощью которого возможно оценить интенсивность исторических землетрясений и реконструировать направление распространения сейсмических подвижек.

Подобные разрушения наблюдались и многократно исследовались по всему миру, но данные их ориентировки по отношению к эпицентру можно встретить лишь в немногих сообщениях [5]. Особенности разрушений мы систематически использовали как независимый индикатор при определении местоположения макросейсмического эпицентра Суусамырского землетрясения (19 августа 1992 г., $M_s = 7.3$, $I_0 = IX-X$ баллов), произошедшего в горах Тянь-Шаня [4]. Было подтверждено, что преимущественная ориентация деформаций находится в соответствии с локальным направлением распространения сейсмических волн, записанных сетью сейсмических станций.

Обрушения или наклоны элементов зданий ориентированы к эпицентру или от него. Если пораженное место находится в квадранте сжатия, то деформация будет вызвана толкающими движениями, приложенными к грунту, что приведет к наклону или обрушению в сторону эпицентра (рис.4). Наоборот, в местах, расположенных в квадранте растяжения, деформация производится дергающими движениями, вызывая наклон и обрушение в сторону от эпицентра. В любом случае

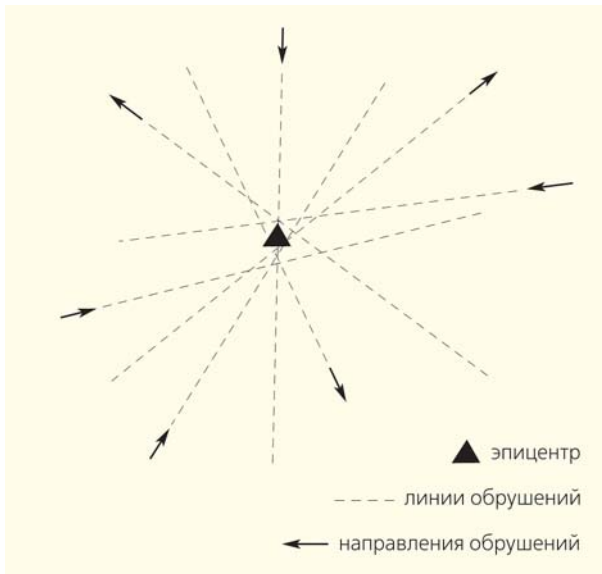


Рис.5. Определение местоположения эпицентра землетрясения с использованием направлений обрушений [4]. Так как обрушение происходит по направлению к эпицентру или от него, пересечения линий обрушения рассеяны вокруг эпицентра, что позволяет изобразить его графически.

линия обрушения будет соединять первоначальную позицию объекта и его положение после землетрясения или соответствовать азимуту падения. Точки пересечения линий обрушения, замеренные во многих местах, сойдутся в эпицентральной области (рис.5) [4].

Латеральный (в плане) изгиб стен также служит кинематическим индикатором, позволяющим выявить сейсмическую природу наблюдаемой деформации и определить местное направление суммарных максимальных сейсмических колебаний. Стены большой протяженности во время сильных горизонтальных подвижек грунта подвергаются значительным колебаниям. Верхние части стен при этом обычно обрушаются, а нижние, более эластичные, изгибаются (рис.6).

В сейсмически пораженной области часто наблюдаются повернутые блоки, кирпичи, камни или постаменты колонн. Вращение вызывается сдвиговой парой сил, приложенной к плоскому элементу конструкции. Сейсмические колебания, направленные параллельно или перпендикулярно к стенам здания, приведут к их обрушению, смещению или наклону без вращения. Вращение же происходит, когда главные напряжения приложены под углом к элементу конструкции, а результирующие сдвиговые напряжения высоки. Таким образом, развернутые элементы, находящиеся на перпендикулярно ориентированных стенах, должны иметь противоположное направление вращения, если максимальные суммарные сейсмические колебания были направлены вдоль биссектрисы между двумя стенами (рис.7).

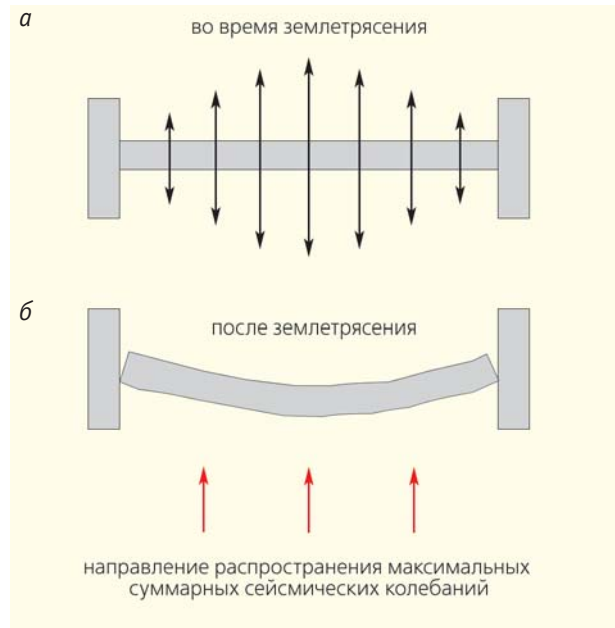


Рис.6. Поведение стен во время сильных горизонтальных колебаний грунта. Вид в плане: *а* — колебания стены, *б* — латеральный изгиб стены, вызванный движениями грунта.

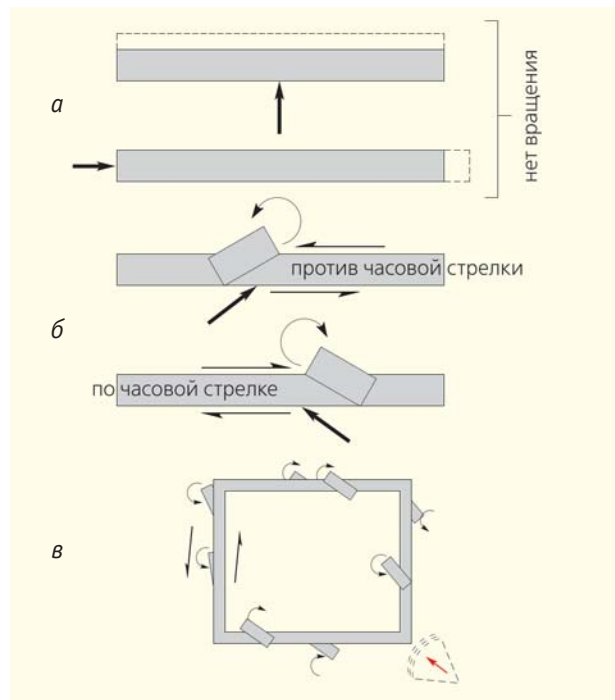


Рис.7. Вращение элементов здания ([4], с изм.): *а* — максимальные суммарные сейсмические колебания, перпендикулярные к стене, не вызывают вращения; *б* — сейсмические колебания, направленные под углом к стене, приводят к вращению элементов здания; *в* — сейсмические подвижки, направленные вдоль биссектрисы между перпендикулярными стенами здания, вызывают противоположное вращение в этих стенах.

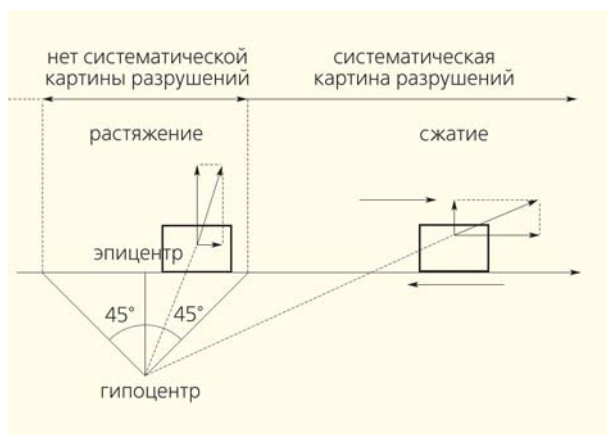


Рис.8. Схема различных типов сейсмических разрушений, происходящих под различными углами от гипоцентра [4].

Подобный анализ ведет к дополнительному заключению, которое объясняет отсутствие ориентированных наклонов и обрушений в эпицентральной области. Сейсмические колебания, движущиеся под высоким углом от гипоцентра к поверхности, приводят к латеральному растяжению строительных конструкций. Этот факт объясняет, почему при известных современных землетрясениях (Акапулько, 1962; Скопле, 1963; Ташкент, 1966 и др.) в областях над гипоцентром не наблюдались систематические наклоны и обрушения, в то время как на некотором расстоянии от эпицентра указанные деформации постоянно проявлялись (рис.8).

Во многих старых зданиях, даже построенных очень качественно, со временем начинается растрескивание. Появление трещин вызывается накоплением статической («мертвой») нагрузки, «старением» строительных материалов, выветриванием. Растрескивание может быть и следствием военных действий (при использовании тарана или при бомбежке), а также произойти в результате движения грунта во время сильного землетрясения.

В целом различные типы трещин по конфигурации разделяются на две основные группы: ортогональные и сквозные (рис.9). Ортогональные тре-

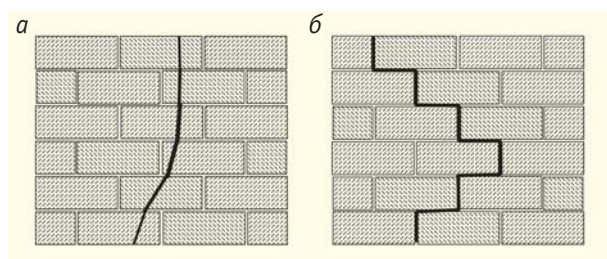


Рис.9. Различные виды трещин в поврежденных стенах: а — сквозные, предполагающие их сейсмогенное происхождение; б — ортогональные, возникающие как при статической нагрузке, так и при сейсмических колебаниях.

щины для своего распространения обычно используют пространство между кирпичами (строительными блоками), как наиболее легкий путь для разрыва стены. Они возникают под действием статических и динамических процессов.

В отличие от ортогональных — межблоковых, сквозные трещины возникают лишь при сильном динамическом воздействии [4]. Например, при крупных землетрясениях для преодоления «тектонической тени» свободных поверхностей на границах каменных блоков (т.е. свободного пространства между соседними кирпичами или камнями) требуется значительная энергия. Таким образом, появление сквозных трещин в стенах зданий очень важно при определении сейсмогенности повреждений и при оценке сейсмической интенсивности исторических землетрясений.

В структурной геологии для реконструкции движений и сил, действующих во время деформационных событий, применяются кинематические индикаторы. Однако подобные детали, но вызванные сейсмическими колебаниями, остаются в строительных конструкциях и рельефе и после сильных землетрясений, обеспечивая запись сейсмически наведенной деформации. Современное Суусамырское землетрясение и деформации в древнем городе Авдате в пустыне Негев (Израиль) [4] использовались для формулировки и калибровки сейсмических кинематических индикаторов. Мы проинспектировали следующие особенности деформаций строительных элементов:

- наклоны и обрушения стен, их фрагментов, арочных перекрытий, крыш и других строительных конструкций;
- смещение отдельных блоков в стенах, арках и колоннах;
- вращение отдельных блоков и больших фрагментов арок и стен;
- трещины, проходящие через несколько соседних строительных блоков.

Таким образом, было установлено, что преимущественно ориентированные обрушения, наклон, вращение стен, ограждений, арок и других элементов зданий представляют собой надежный инструмент для реконструкции сейсмических событий. Поскольку древние города расположены на всей территории Тянь-Шаня, пустыни Негев и окружающих регионов, данные по археосейсмологии уточняют оценки повторяемости сильных землетрясений, определения местоположения эпицентров древних толчков и их силы.

Наши результаты

Мы применили вышеописанный археосейсмологический подход к исследованию древнего Илурата и обнаружили следующее.

Сквозные трещины (точки наблюдения 1, 3—5 на рис.2), пробивали несколько камней подряд

(рис.10). Напомним, что такие трещины возникают лишь при больших динамических нагрузках (взрывах, действии тарана, землетрясениях). Взрывы можно исключить: раскопки археологического памятника начались уже после Великой Отечественной войны. Тараны вряд ли часто использовались в небольших внутренних помещениях. Остается сильное землетрясение. Учитывая, что подобные трещины распространялись преимущественно в стенах северо-северо-восточного простирания, то и максимальное суммарное сейсмическое воздействие было приложено приблизительно вдоль этой оси.

Мы наблюдали и разворот верхнего фрагмента стены на 9° (с первоначальным простиранием 125°) вокруг вертикальной оси по часовой стрелке (рис.11,а). Длина повернутого фрагмента 3.5 м, высота 0.5 м, ширина 0.7 м. Максимальное его смещение от первоначального положения составляло 0.3 м в юго-западном направлении.

Кроме того, в конструкциях города были обнаружены следы двух землетрясений. При первом событии повредился дверной вход (азимут простирания 110°), который затем был заложен каменными блоками (рис.11,б). При втором событии произошел разворот по часовой стрелке дверного порога (на 13°) и вторичной каменной кладки (на 7°). В дополнение к развороту порог был выбит в северном направлении на 38 см, а каменная кладка — на 20 см.

Наблюдали мы и S-образную (в плане) деформацию стены шириной 55 см с общим простиранием 175° . Ее северная часть выгнулась на запад до 20 см, а южная — на 50 см на восток (рис.12,а). Такую деформацию получили лишь верхние ряды кладки («эффект небоскреба»). Нижний же ряд остался почти прямолинейным. Величина деформации возрастает вверх. Трудно себе представить, что древние рабочие изначально

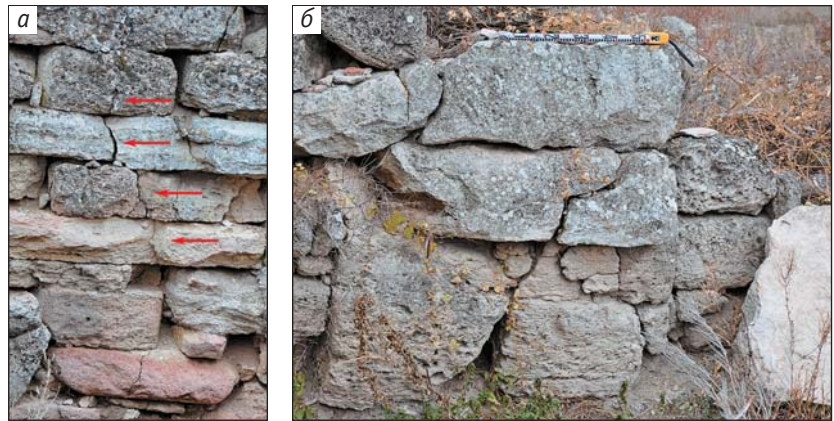


Рис.10. Сквозные трещины в Илурате: а — трещина (показана стрелками), пробивающая в стене четыре строительных блока подряд (точка наблюдения 4 в квартале IV); б — трещина длиной 1 м, пробивающая в стене два камня подряд (точка наблюдения 6 в квартале IV);

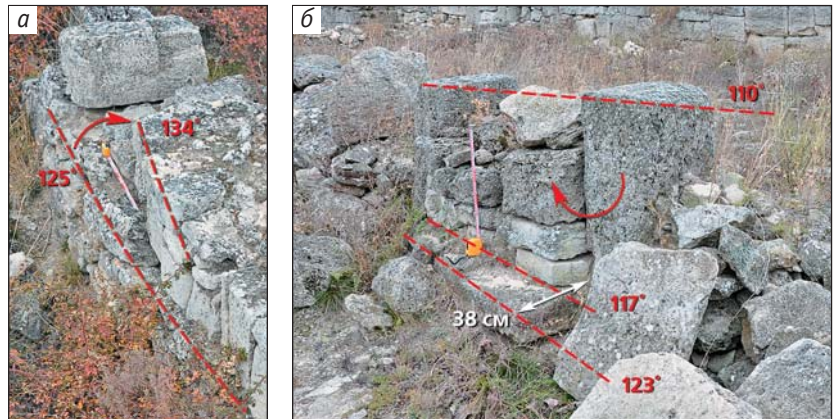


Рис.11. Развороты строительных конструкций Илурате: а — разворот верхнего фрагмента стены вокруг вертикальной оси по часовой стрелке (точка наблюдения 8 в квартале I); б — повороты по часовой стрелке ступеньки и дверного заклада (точка наблюдения 2 в квартале IV).

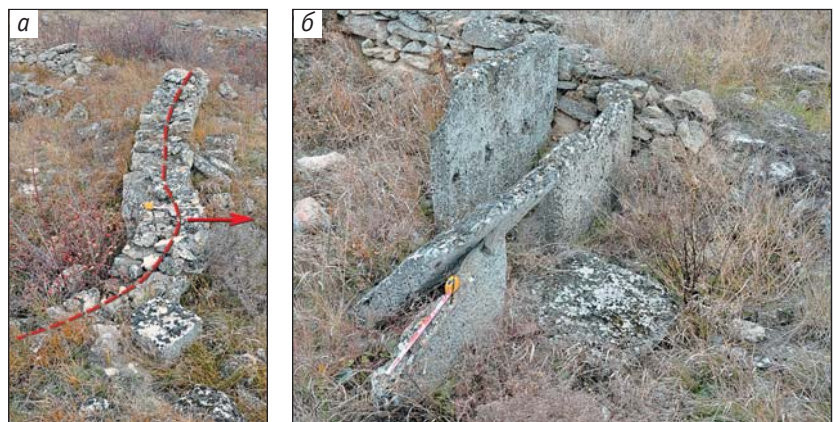


Рис.12. Деформации и обрушения в Илурате: а — S-образная (в плане) деформация субмеридиональной стены (точка наблюдения 6 в квартале III); б — наклоны и обрушения строительных блоков-плит (точка наблюдения 7 в квартале III).

Фото А.М.Корженкова

строили стены так неровно. Скорее всего, они деформировались в результате колебательных движений во время сильного землетрясения. Максимальное суммарное сейсмическое воздействие в данном случае было направлено перпендикулярно простиранию стены.

В квартале III Илурата мы видели наклоны и обрушения строительных блоков (рис.12,б). Плиты для загонов скота (письменное сообщение Д.Бейлина), присоединенные к смежной перпендикулярной стене, устояли, остальные же наклонились и обрушились на востоко-юго-восток (110°). Первоначальное простирание всех плит составляло 20°. Отметим, что их наклон не совпадает с общим наклоном рельефа (на север).

Исторические данные

Крепость Илурат погибла вскоре после 267 г. Такую дату позволил уточнить клад, найденный В.А.Горончаровским в центре города [2]. Археолог исследовал небольшой дом, выходящий с восточной стороны на перекресток двух главных улиц. Одно из его помещений, целиком вымощенное каменными плитами, предназначалось для содержания скота. Под угловой плитой этой вымостки и оказался металлический комок зеленоватого оттенка, в котором находились монеты прекрасной сохранности. На их лицевой стороне изображен бюст царя Рескупорида V (242/43–275/76), а на оборотной — правивший в год выпуска монет римский император. Монеты датированы по боспорской эре (которая легко переводится в современное летоисчисление), т.е. они были отчеканены в период 242–267 гг.

В последующие семь лет чеканка монет в Боспоре не проводилась, что было связано с враждебными действиями вторгшихся в Крым германских племен готов, боранов, герулов и их сарматских союзников. Скорее всего, именно на это время и приходится гибель крепости. Возможно, ее жители получили известие о нападении заранее. Укрепленные пункты на западных рубежах государства находились не так уж далеко друг от друга, и, очевидно, они могли связываться между собой световой сигнализацией. Защищать крепость, видимо, было признано бессмысленным. Почему это произошло, в какой-то степени объясняют результаты раскопок в северо-восточном районе городища. Там Горончаровский исследовал дом, который был настолько основательно разрушен при землетрясении, произошедшем в середине III в., что каменный завал мощностью до метра даже не стали разбирать, а прямо на его выровненной поверхности надстроили и укрепили старые и возвели новые стены. Между землетрясением и прекращением существования дома прошло немного лет, так как новый уровень двора не успели перекрыть вымосткой.

Следы повреждений середины III в. отмечены Горончаровским и в других поселениях с террасированными склонами Европейского Боспора. Даже если стены и башни Илурата хотя бы частично пострадали в результате подземных толчков, восстановить их в условиях нестабильной обстановки и финансовых затруднений в государстве вряд ли представлялось возможным. Судя по отдельным строительным остаткам, кто-то еще возвращался на родное пепелище, но оборонительные сооружения так и остались лежать в руинах. В VIII–IX вв., когда Восточный Крым контролировался хазарами, их использовали (уже в совершенно других — мирных — целях) для постройки загонов для скота.

Геологические свидетельства древних землетрясений

Сильные землетрясения оставляют на поверхности геологические следы, которые можно объединить в две основные группы: выходы очага землетрясения на поверхность в виде сейсмостектонических разрывов и последствия сейсмических сотрясений в виде обвалов, оползней, разнообразных деформаций в подвижных обводненных осадках.

На Керченском п-ове обнаружены практически все типы геологических следов землетрясений. Наиболее уверенно о положении очага позволяют судить сейсмостектонические разрывы в молодых слоях и формах рельефа, встреченные на азовском и черноморском побережьях полуострова (рис.13). На азовском побережье они датированы XV–X вв.



Рис.13. Карта расположения археологических памятников, для которых имеются сведения о сейсмических разрушениях III в., и древних сейсмостектонических разрывов.

до н.э., IV–II вв. до н.э. и XVIII в. н.э. [6]. Следы землетрясения III в. н.э., датированные археологическими методами [7], известны и на черноморском побережье, где расположены эффектные расселины и обрывы горы Опук [8].

Опук представляет собой небольшое плато, на котором неогеновые известняки залегают в виде покрывки на глинистых отложениях, что создает благоприятные условия для образования оползней (рис.14). Но кроме многочисленных оползней плато пересекают колоссальные расселины глубиной до 30 м и уступы высотой до 40 м, развитые исключительно в известняках (рис.15). Сейсмическое происхождение данных нарушений надежно доказывают крупные глыбы размером с двухэтажный дом, отброшенные и перевернутые в магистральном рве. На глинистых склонах плато нарушения переходят в пологие, сильно заплывшие уступы, однако магистральный разрыв уверенно прослеживается от одного пляжа до другого через весь небольшой полуостров.

О тектонической природе нарушений свидетельствует и прямолинейность магистрального разрыва, и распространение его за пределы многочисленных оползней. У западного подножия горы Опук разрыв сечет три уровня морских террас (рис.16), покров которых сложен характерными пляжными песками с многочисленными раковинами моллюсков. Нижняя терраса, по всей видимости, образовалась во время нимфейской трансгрессии, т.е. 1–2 тыс. лет назад [9]. Все террасы на пересечении с магистральным рвом в разной степени деформированы. Это говорит о многократном возрождении рва при нескольких событиях.

Разрыв на горе Опук, скорее всего, сейсмотектонический. Но смещение многократно усиливалось оползанием скального массива в сторону моря. По всей видимости, на сушу вышла лишь окраина крупной сейсмогенерирующей структуры, расположенной в акватории Черного моря.

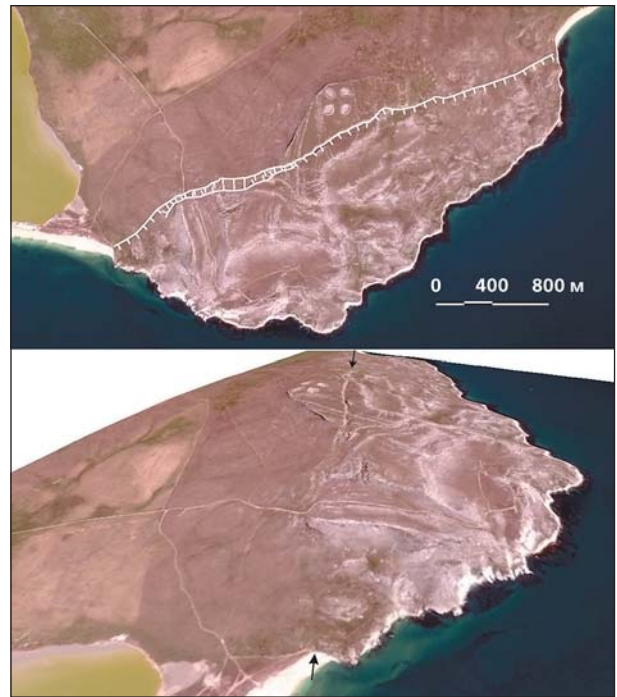


Рис.14. Гора Опук на космическом снимке высокого разрешения (вверху) и на трехмерной модели рельефа. Линиями и стрелками показан магистральный разрыв.

Следы землетрясения удалось датировать благодаря хорошей археологической изученности античного г.Киммерик, остатки которого сохранились на горе Опук. Это один из малых приморских городов Боспорского царства, возникший на рубеже VI–V вв. до н.э. [7]. До раннего средневековья здесь жили люди, создавшие хорошо сохранившийся природно-антропогенный ландшафт. Остатки античной цитадели и нескольких поселений, а также сельскохозяйственных, транспортных, гидротехнических и других сооружений рас-



Рис.15. Нарушения на горе Опук: *а* — магистральный разрыв в западной части плато, глыба размером примерно 6×10 м (показана стрелкой) была отброшена и повернута вокруг своей оси; *б* — уступ высотой до 40 м в восточной части плато. Здесь и далее фото А.Н.Овсяченко

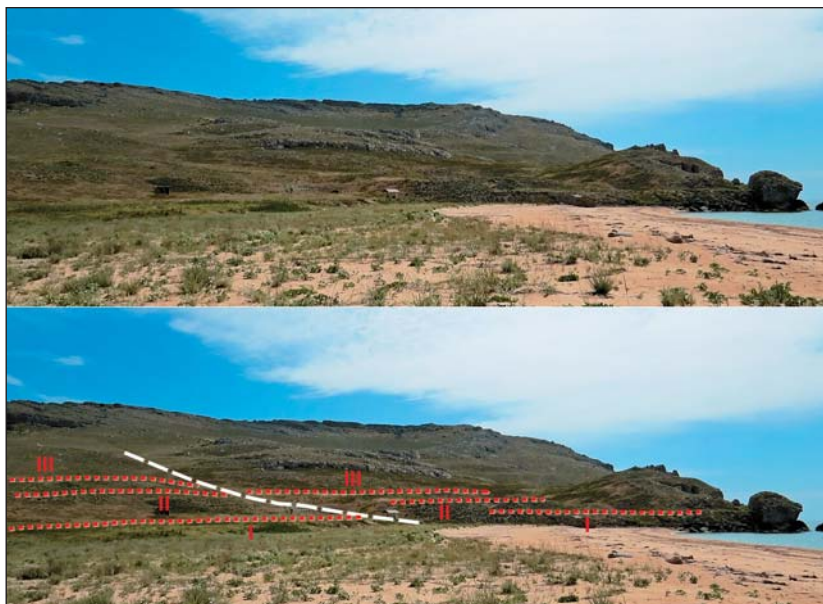


Рис.16. Террасы у западного подножия горы Опук. Разрыв показан штриховой линией, бровки террас обозначены пунктирными линиями и пронумерованы.

положены как на самой горе, так и на ее склонах. О возрасте последнего землетрясения наиболее определенно свидетельствуют трещины, затухающие в культурных слоях II–III вв. В конце III в. начала угасать жизнь Киммерика, и он прекратил свое существование [7].

Землетрясения второй половины III в. оставили следы не только в Илурате и Киммерике. Разруше-

шившего древний Илурат, располагался у южного побережья Керченского п-ова. Возраст последнего события (вторая половина III в.) здесь довольно надежно датируется по археологическим данным, когда античный город Киммерик прекратил свое существование [7]. Это катастрофическое землетрясение привело к разрушениям на территории почти всего Керченского п-ова. ■

ния хозяйственно-жилых построек, сельскохозяйственных террас, подпорных стен, выявленные при раскопках античных поселений Артезиан и Золотое на севере Керченского п-ова, не объясняются ни военными действиями, ни пожарами [10]. Разрушения произошли в середине — второй половине III в. и в конечном итоге привели к деградации и прекращению жизни в этих поселениях. Третьим веком — первой половиной четвертого датированы и следы землетрясения, в результате которого жители покинули античный город Китей [11]. Возможно, следы разрушений III в. имеются также в руинах небольшого античного городка Зенонов Херсонес на мысе Зюк [12].

Колоссальные разрывы на горе Опук свидетельствуют о том, что очаг землетрясения, разру-

Приведенные в статье материалы получены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-05-06197).

Литература

1. Гайдужевич В.Ф. Боспорское царство. М.; Л., 1949.
2. Горончаровский В.А. Оборонительная система Илурата // Российская археология. 2006. №4. С.119–130.
3. Корженков А.М., Лемзин И.Н. Макросейсмическое обследование и геологические условия Кочкор-Атинского (1992, МЛН = 6.2) землетрясения в Южном Кыргызстане // Наука и новые технологии. 2000. №3. С.14–21.
4. Корженков А.М., Мазор Э. Структурная реконструкция сейсмических событий: руины древних городов как окаменевшие сейсмографы // Изв. МОН РК, НАН РК. Серия общественных наук. 2001. №1. С.108–125.
5. Коньков А.А. Локализация плейстоценовой зоны землетрясений азимутальным методом // Сильные землетрясения Средней Азии и Казахстана. Вып.1. 1970. С.157–177.
6. Овсяченко А.Н., Шварев С.В., Ларьков А.С., Мараханов А.В. Следы сильных землетрясений Керченско-Таманского региона по геологическим данным // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т.42. №3. С.33–54.
7. Голенко В.К. Древний Киммерик и его округа. Симферополь, 2006.
8. Борисенко Л.С., Пустовойтенко Б.Г., Дублянский В.Н. и др. Сейсмодислокации и палеосейсмичность Крыма // Сейсмологический бюллетень Украины за 1997 год. Симферополь, 1999. С.101–132.
9. Горлов Ю.В., Поротов А.В., Столярова Е.В. К оценке изменений уровня Черного моря в античный период по археолого-палеогеографическим данным // Древности Боспора. Вып.7. 2004. С.117–127.
10. Винокуров Н.И., Никонов А.А. О следах землетрясений Античного времени на западе Европейского Боспора // Российская археология. 1998. №4. С.98–115.
11. Молев Е.А. Боспорский город Китей. Симферополь; Керчь, 2010.
12. Аркелян Ф.О. Исследование раскопок античных сооружений на Керченском полуострове для оценки интенсивности разрушительных землетрясений // Изв. АН АрмССР. Сер. Науки о Земле. 1983. Т.34. №4. С.40–49.

Молекулярная эволюция: как киты уходили под воду

М.С.Гельфанд

По-видимому, первым родство китов и копытных предположил британский зоолог Фрэнк Беддарт, известный прежде всего работами о червях, но написавший также в 1890 г. «Книгу о китах» [1]. Спустя столетие, к середине 1990-х годов, в среде зоологов и палеонтологов сложился консенсус: ближайшими родственниками или даже предками китов (Cetacea) стали считать вымерших хищных (!) копытных — мезонихий (Mesonychia). Однако таксономические взаимоотношения между ними и отрядами парнокопытных (Artiodactyla) и непарнокопытных (Perissodactyla) оставались не вполне ясными: то ли мезонихии — предки китов и парнокопытных, то ли парнокопытные — сестринская группа по отношению к китам и мезонихиям [2, 3]. В любом случае все сходились во мнении, что ближайшая к китам группа из ныне живущих — парнокопытные и что вместе они образуют группу (кладу) китопарнокопытных (Cetartiodactyla). Молекулярные данные позволили существенно уточнить эту картину.

Филогенетические деревья

На основании анализа митохондриальных геномов была выдвинута гипотеза, согласно которой киты близки к подотряду жвачных парнокопытных (Ruminantia). Более далекими родственниками тех и других оказались остальные парнокопытные из подотрядов свинообразных (Suiformes), к которым тогда причисляли и гиппопотамов, и мозолоногих (Tylopoda), к которым относятся только верблюдовые [4]. Кроме того, результаты анализа белковых



Михаил Сергеевич Гельфанд, доктор биологических наук, член Европейской академии, заместитель директора Института проблем передачи информации имени А.А.Харкевича РАН, профессор факультета биоинженерии и биоинформатики Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — биоинформатика, сравнительная и функциональная геномика, молекулярная эволюция, системная биология, метагеномика.

Ключевые слова: молекулярная эволюция, филогенетика, киты, гиппопотамы, парнокопытные, миоглобин, адаптация.

Key words: molecular evolution, phylogenetics, whales, hippopotamuses, even-toed ungulates, myoglobin, adaptation.

последовательностей цитохрома *b* [5], α - и β -казеина [6], γ -фибриногена [7], ретиноид-связывающего белка IRBP и фактора Виллебранда [8], панкреатической рибонуклеазы [9] указывали на то, что ближайшие родственники китов — гиппопотамы.

Однако существовали и опровергающие аргументы. В частности, писали о том, что формирование ветвей Ruminantia + Cetacea (в отличие от принятых до этого Ruminantia + Suiformes) и тем более Hippopotamidae + Cetacea зависит от параметров эволюционной модели, принятой при построении филогенетического дерева [10]. Аналогичным образом взаимоотношения между китами и подотрядами парнокопытных не могли быть определены при анализе митохондриальных 12S РНК [11]. Одновременный анализ молекулярных и морфологических данных, позволяющий учесть и вымершие виды, также не поддерживал гипотезу, согласно которой ветвь китов отходит от ветви парнокопытных [2].

Точку в споре поставил анализ не отдельных генов, а геномов в целом. Определение полного митохондриального генома гиппопотамы (*Hippo-*

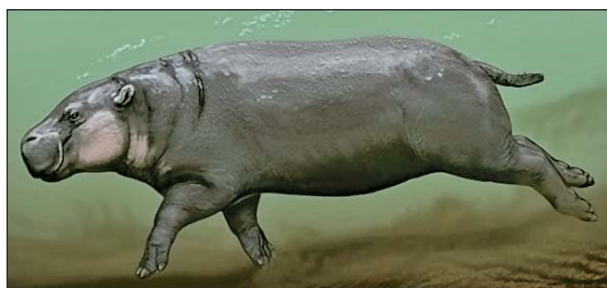


Рис.1. Современные киты и их ближайший родственник из ныне живущих [13]. Сверху вниз изображены представители двух подотрядов китов: голубой кит (*Balaenoptera musculus*) из усатых и кашалот (*Physeter macrocephalus*) из зубатых — и карликовый бегемот (*Choeropsis liberiensis*).

potamus amphibius) показало его близкое родство с китами [12] (рис.1). Аналогичным оказался результат исследования повторяющихся элементов в ядерных геномах. У китов, гиппопотамов и жвачных парнокопытных, но не у свиней и верблюдов обнаружили два семейства специфических повторов [14], причем их эволюцию, в частности появление новых вариантов повторов, проследили детально [15]. Кроме того, так как геномы очень велики, а вставки повторяющихся элементов — события относительно редкие, они почти никогда не появляются в одном месте в разных геномах неза-

висимо, а стало быть, дают возможность детально проследить эволюцию на относительно малых временах. Когда набралось достаточное количество данных, гипотеза о родстве китов и гиппопотамов была окончательно подтверждена [16]. Сомнения, касающиеся методики построения филогенетических деревьев по отдельным белкам, разрешились благодаря тому, что увеличение набора данных, например, при анализе 121 однокопийного гена ядерного генома 21 представителя китопарнокопытных, сделало построенные деревья статистически устойчивыми [17]. Такой же результат дал анализ митохондриальных геномов 183 видов китопарнокопытных (включая 128 новосеквенированных), среди которых были представители всех известных семейств [18]. Расхождение ветвей, ведущих к современным китам, произошло в раннем олигоцене (34–28 млн лет назад) или, по другим работам, 37–33 млн лет назад, тогда как расхождение предков китов и гиппопотамов датируется 55–50 млн лет назад [19].

Подоспели и новые палеонтологические данные (рис.2). Родство китов и парнокопытных подтверждалось находками костей голени ранних китов [13]. Был описан род *Indobyus* — парнокопытных, образующих ближайшую сестринскую группу по отношению к китам после их разделения с гиппопотами [20]. Скелеты сухопутных предшественников китов, *Ichthyolestes pinfoldi* (размером с лису) и *Pakicetus attockii* (размером с волка), явно больше походили на скелеты парнокопытных, чем мезонихий, хотя морфологический анализ не подтверждал родства с гиппопотами [21]. Однако при повторном анализе тех же скелетов ветвь гиппопотамов и китов была восстановлена [22]. Строение конечностей еще двух предков китов, *Artiocetus clavis* и *Rodhocetus balochistanensis*, также имеет общие черты со строением конечностей парнокопытных, но не мезонихий [23]. Построение филогенетических деревьев, учитывающих одновременно и геномные последовательности, и морфологические признаки современных китов, их предков и представителей вымерших линий, позволило датировать основные анатомические и физиологические изменения, привязав их к внутренним узлам филогенетического дерева [19, 24] (рис.3).

Затем был проведен сравнительный анализ отдельных генов различных видов китов и других млекопитающих. Кроме того, были проанализированы полные геномы представителей двух подотрядов ныне живущих китов: зубатого кита — китайского речного дельфина, или байцизи* (*Lipotes vexillifer*) [25], и усатого кита — малого полосатика (*Balaenoptera acutorostrata*) [26]. Было также проведено сравнение больших фрагментов геномов ряда других китообразных: дельфина-бутылконоса (*Tursiops truncatus*), финвала (*Balaenoptera phy-*

* До 1900 г. популяция составляла несколько тысяч особей, однако в 2007 г. вид уже был объявлен исчезнувшим.

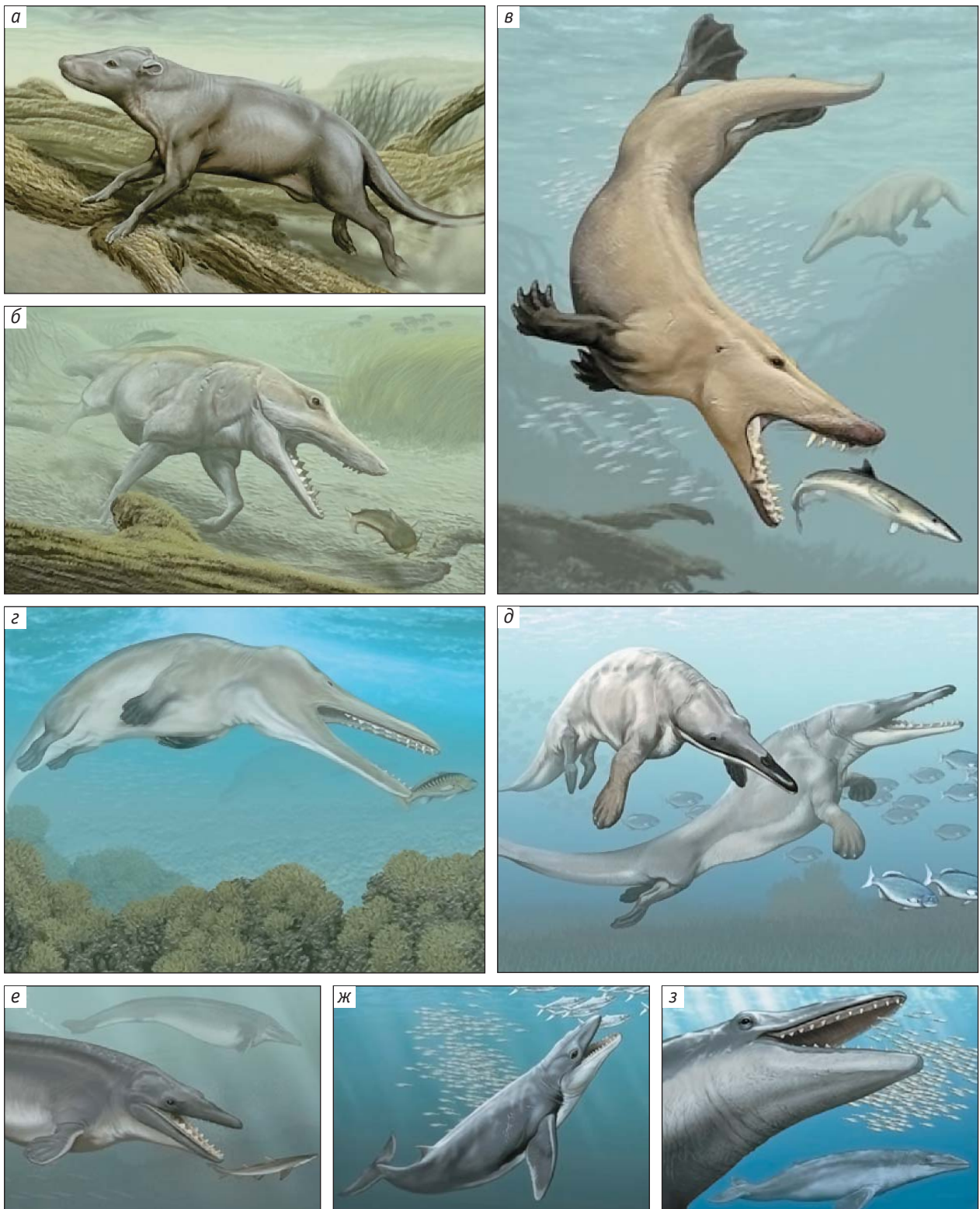


Рис.2. Вымершие предки китов, заполняющие огромную морфологическую пропасть между современными китами и гиппопотомами [13]: индохиус (а; род *Indohyus*, семейство Raoellidae); пакицет, или так называемый пакистанский кит (б; род *Pakicetus*, семейство Pakicetidae); амбулоцет, или так называемый ходящий кит (в; род *Ambulocetus*, семейство Ambulocetidae); ремингтоноцет (г; род *Remingtonocetus*, семейство Remingtonocetidae); георгиацет (д; род *Georgiacetus*, семейство Protocetidae); дорудон (е; род *Dorudon*, семейство Basilosauridae); янджуцет (ж; род *Janjucetus*, семейство Janjucetidae); этиоцет (з; род *Aetiocetus*, семейство Aetiocetidae).

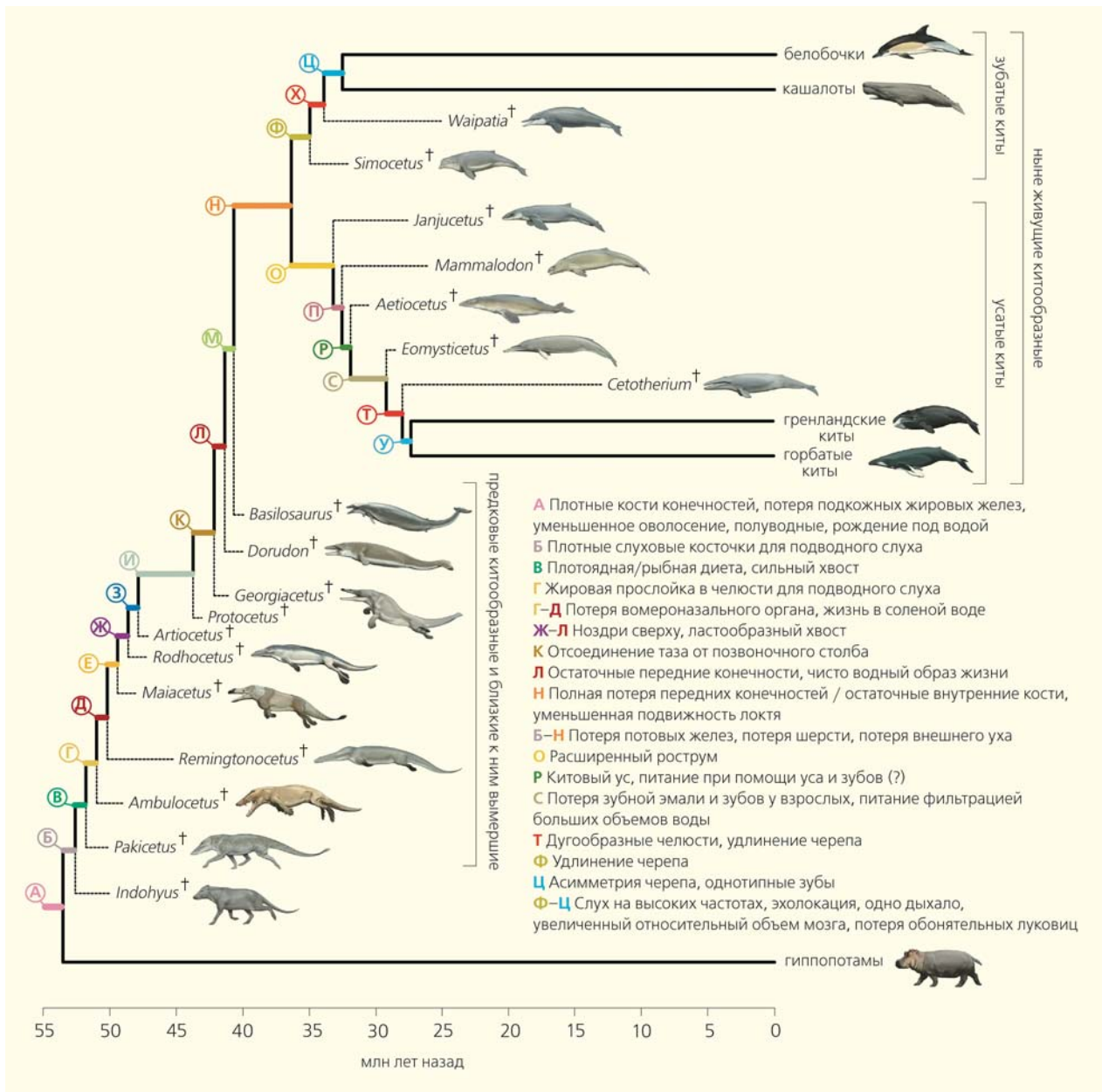


Рис.3. Филогенетическое дерево китов, построенное с учетом геномных последовательностей и палеонтологических данных [24]. Основные анатомические и физиологические адаптации к жизни в воде, произошедшие в процессе эволюции китов, привязаны к внутренним ветвям дерева. Вымершие роды отмечены крестиком.

salus), бесперой морской свиньи (*Neophocaena phocaenoides*) [26]. Все это в совокупности позволило описать паттерн эволюции — положительный отбор (поощряющий изменения; оценивается как отношение потока значимых замен в последовательности гена к синонимичным) — и, наоборот, потерю функций генов вследствие инактивирующих мутаций (сдвигов рамки считывания, нонсенс-мутаций) и сопоставить наблюдаемые события, происходившие на молекулярном уровне, с макроскопическими изменениями в анатомии и физиологии животных.

Миоглобин: киты учатся нырять

Кислород в мышцах запасается в комплексе с белком миоглобином, который гомологичен гемоглобину крови, но эволюционно разошелся с ним уже очень давно. Погружение под воду на длительное время требует больших запасов кислорода, а значит, и большей концентрации миоглобина. Действительно, концентрация миоглобина у китов в 10–20 раз выше, чем у их наземных родственников [27]. Более того, концентрация миоглобина в скелетных мышцах выше у тех китов, у которых

больше интервал между вдо-
хами, и выше у взрослых особей по
сравнению с детенышами, что,
по-видимому, отражает посте-
пенное уменьшение частоты ды-
хания с возрастом [28]. Анало-
гичный результат был получен
и при анализе большего числа
видов [29]. Учет концентрации
миоглобина и массы тела позво-
ляет объяснить большую часть
вариаций в продолжительности
погружений [30]. В то же время
не было обнаружено никакой
связи между способностью мио-
глобина связывать кислород и
длительностью и глубиной по-
гружений [29].

При чрезмерной concentra-
ции миоглобина его молекулы
агрегируют, теряют стабиль-
ность и становятся нефункци-
ональными. Положительный от-
бор, действующий на миогло-
бин китов, привел к увеличению
его стабильности за счет гидро-
фобных взаимодействий и обра-
зования дополнительных водо-
родных связей. При этом наблю-
дается корреляция между ста-
бильностью и концентрацией
миоглобина у разных видов [31].
Приспособление к глубоковод-
ному нырянию произошло у об-
щего предка зубатых и усатых
китов до расхождения их вет-
вей. Способность погружаться
на большие глубины усилилась
у кашалота и несколько ослаб-
ла у дельфинов и морских сви-
ней [32]. При этом у разных се-
мейств наблюдаются параллель-
ные замены [33]. Следует отме-
тить, однако, что списки кон-
кретных позиций, находящихся
под действием положительного
отбора, в разных статьях могут
довольно значительно разли-
чаться вследствие неодинаковости выборок и вы-
числительных моделей. Эти различия, кста-
ти, представляют собой интересную тему для будуще-
го исследования.

Совокупность этих наблюдений позволяет
предсказывать продолжительность погружений
для предков китов [34]. В самом деле, наблюдается
линейная зависимость между поверхностным за-
рядом и максимальной концентрацией миоглоби-
на в скелетных мышцах, а последняя линейно свя-
зана с логарифмом массы тела и логарифмом про-
должительности вдоха. Массу тела вымершего жи-

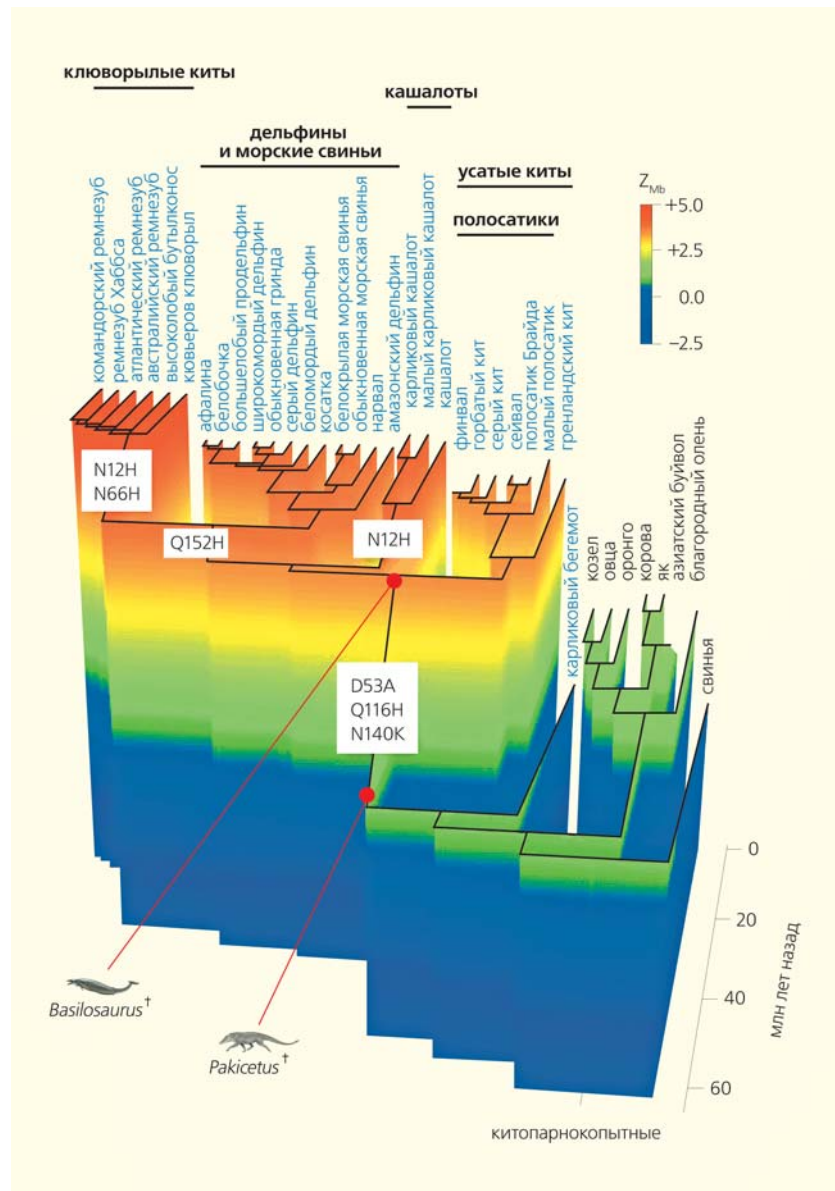


Рис.4. Филогенетическое дерево китопарнокопытных и поверхностный заряд миоглобина (Z_{Mb}), показанный высотой ветви и ее цветом [34]. Указано положение вымерших предковых форм (обозначены крестиком) и критические аминокислотные замены, увеличивающие заряд (в прямоугольных рамках). Названия ныряющих и наземных видов подписаны синим и черным цветом соответственно.

вотного можно оценить по его скелету. Для того чтобы узнать поверхностный заряд миоглобина у предкового вида, надо реконструировать аминокислотную последовательность белка. Пространственная структура миоглобина очень консервативна, а потому, зная последовательность предкового белка, легко смоделировать его структуру и подсчитать поверхностный заряд стандартными методами (рис.4). Итак, теперь мы знаем все, что нужно, чтобы увидеть, как у предков китов постепенно увеличивалась максимальная продолжительность непрерывного пребывания под водой (рис.5).

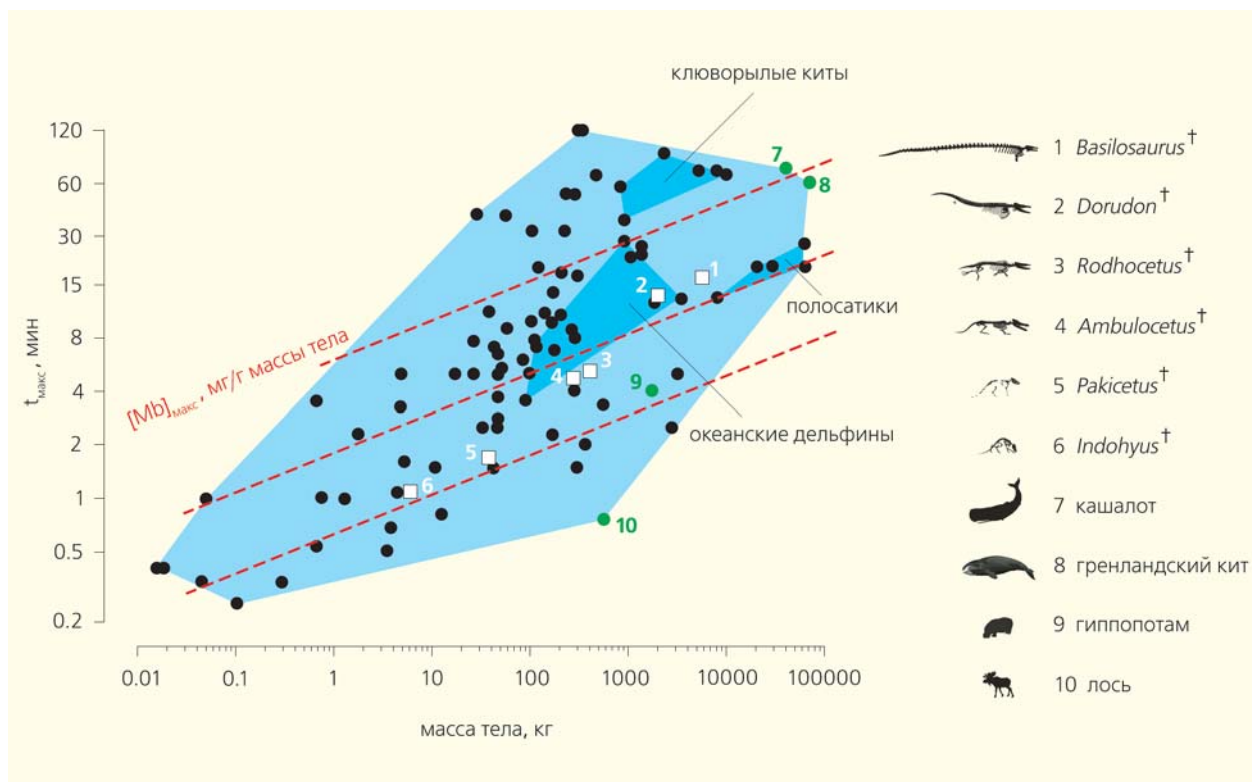


Рис.5. Зависимость максимального интервала между вдохами (t_{\max}) от максимальной концентрации миоглобина ($[Mb]_{\max}$) и массы тела у китопарнокопытных [34]. По горизонтальной оси отложена масса тела, по вертикальной — максимальный интервал между вдохами. Концентрация миоглобина показана пунктирными линиями уровня. Выделены области значений, характерные для всех млекопитающих (светлым многоугольником) и для разных групп китов (темными). Точками показаны значения для ныне существующих животных, квадратами — предсказанные значения для вымерших предков китов.

Дополнительные примеры молекулярных адаптаций к недостатку кислорода будут приведены далее, при обсуждении конкретных физиологических систем.

Мозг и органы чувств

Переход к жизни в водной среде сильно поменял органы чувств китов: зрение приспособилось к другому освещению; сильно редуцировалось (у усатых китов) или совсем исчезло (у зубатых) обоняние; появилась эхолокация в ультразвуковом диапазоне. При этом киты обладают самым большим среди млекопитающих головным мозгом, и у них, по всей видимости, имеется сложная система коммуникации. Многие исследователи пытались найти генетические корреляты этих изменений. Ряд наблюдений представляется весьма многообещающим, хотя, безусловно, уровня наших знаний о сложных регуляторных взаимодействиях в эмбриональном и эволюционном развитии млекопитающих недостаточно для того, чтобы говорить о прямых причинно-следственных связях.

Пожалуй, одна из основных проблем, связанных с работой мозга у китов, — необходимость

поддерживать высокий уровень метаболизма, а значит, и потребления кислорода при значительном интервале между вдохами. Одним из решений оказалось повышение (в 4–15 раз) уровня экспрессии гена нейроглобина — белка, который участвует в запасании кислорода и защищает от его агрессивных форм ткань мозга [35]. Примечательно, что у ластоногих наблюдается другое приспособление — синтез нейроглобина не в нейронах, а в астроцитах.

Следы действия положительного отбора были найдены в гене микроцефалина, который контролирует размер мозга у млекопитающих, однако сила отбора не коррелировала с размером мозга современных китов [36]. В линии, ведущей к дельфинам, 27 из 228 генов, находящихся под действием положительного отбора, оказались связанными с нервной системой (у человека мутации в этих генах вызывают проблемы с интеллектом и влияют на синаптическую пластичность и сон) [37].

Последствия положительного отбора обнаружались также в генах, кодирующих белки, важные для развития слуховой системы: престин (моторный белок, который вырабатывается в волосковых наружных клетках внутреннего уха) [38, 39], трансмембранный белок TMC1 (механозлектрический

передатчик сигнала волосковых клеток внутренне-го уха) и пажвакин (белок, функция которого не вполне ясна; мутации в соответствующем гене вызывают врожденную потерю слуха) [40], клаудин-14 (белок щелевых контактов, работающий в кортиевоом органе внутреннего уха) [41]. Особенно интересно то, что во многих случаях параллельные изменения происходили и в генах летучих мышей, которые, как известно, используют эхолокацию. Иногда, как в случае генов, кодирующих кадгерин-23 и его лиганд протокадгерин-15 (белки, участвующие в образовании волосковых пучков), а также отоферин (белок, отвечающий на сигнал во внутренних волосковых клетках), ускорения эволюции не наблюдается, но параллелизм изменений у зубатых китов и летучих мышей свидетельствует о действии положительного отбора [42]. Логично предположить, что изменившиеся белки, кодируемые этими генами, как раз и позволяют слышать в ультразвуковом диапазоне. И действительно, прямая связь между изменениями аминокислотной последовательности белка и способностью воспринимать очень высокий ультразвук была показана для престина [43]. Среди 368 генов, находящихся под действием положительного отбора у дельфинов, существенную долю составляют те, которые связаны со слухом [44].

Как и следовало ожидать, утрата обоняния на молекулярном уровне проявляется как потеря генов, кодирующих рецепторы запахов. В результате мутаций они становятся псевдогенами и перестают кодировать функциональные белки, хотя и остаются в геноме [45]. То же касается и вкуса: анализ 10 генов, кодирующих полный репертуар рецепторов T2R для горького, и трех генов, кодирующих все типы рецепторов T1R для сладкого и умами, показал у 12 китов массивную потерю генов. Кроме того, ген, кодирующий рецептор PKD2L1 для кислого, — по-видимому, псевдоген, в то время как рецепторы для соленого функциональны [46]. В другой работе была показана потеря всех рецепторов, за исключением того, который воспринимает соленое [47]. Обеднение или утрата вкуса и обоняния случились у общего предка современных китов, что согласуется и с данными сравнительной анатомии [48].

Так как свет с разной длиной волны проникает в толщу воды с разной эффективностью, одним из приспособлений к водному образу жизни служит смещение максимума спектра поглощения зрительных пигментов. Так, у дельфина-бутылконоса этот максимум сдвинут в сторону коротких длин волн, к синей части спектра, у палочкового пигмента (родопсина) и колбочкового (длинноволнового опсина), причем исследования мутантных пигментов позволили установить конкретные аминокислотные остатки, отвечающие за такой сдвиг [49]. В то же время у водных млекопитающих, живущих на мелководье, такой адаптации не наблюдается, а спектры поглощения

зрительных пигментов совпадают с аналогичными спектрами наземных видов [50]. В гене родопсина у китов положительный отбор затрагивает именно те аминокислотные остатки, мутации в которых приводят к сдвигу максимума поглощения в синюю часть спектра, ведь на глубину, куда ныряют эти животные, лучше всего проникает именно сине-зеленый свет [51]. С одной стороны, у китов наблюдается также сдвиг максимума поглощения у длинноволнового опсина в сторону синего света [52]. С другой — в их геномах есть и псевдоген коротковолнового опсина, нефункциональный из-за многочисленных мутаций, приводящих к сдвигу рамки считывания. Согласно результатам разных исследований, потеря функции случилась или до разделения на зубатых и усатых китов [53, 54], или независимо у тех и других [55]. Комбинация утраты коротковолнового опсина и сдвига максимума поглощения в коротковолновую часть спектра у длинноволнового опсина с родопсином выглядит парадоксально — возможно, дело в относительной датировке этих событий. Отмечают также, что переход к палочковому монохроматизму не сказался на гистологическом строении сетчатки и связанных с ней сигнальных структур, в частности биполярных клеток, взаимодействующих с колбочками, и синапсов колбочек [56], но, опять же, странно говорить о палочковом монохроматизме при сохранении даже одного типа опсина в колбочках. Следовало бы проверить их функциональность, ведь опыты на цветовосприятие у дельфинов кажутся вполне осуществимыми.

Другие функциональные системы

В любой быстро развивающейся области результаты конкретных исследований в деталях могут друг другу противоречить. Скажем, количество генов, находящихся под действием положительного отбора в геноме дельфина, разные исследователи оценили как 228 [37], 368 [44] и 376 [57]. Функциональные системы, в которых особенно часто работают продукты таких генов, включают нервную и сердечно-сосудистую системы, энергетический метаболизм (в особенности глюкозы и липидов), развитие кожи и легких [34], транспорт и локализацию липидов, АТФазную активность, слух и мышечные сокращения [44], сегментацию и развитие мезодермы [57]. В то же время даже такие наборы генов, полученные разными методами (поучительно было бы сравнить полные наборы генов из этих работ), имеют много общего и вполне могут быть интерпретированы в терминах физиологических и анатомических адаптаций. Многие различия могут быть связаны не с изменением генов, а точнее, кодируемых ими белков, а с изменением работы генов — включением, исключением и интенсивностью экспрессии на разных стадиях развития. Од-

нако возможности современных биоинформатики и геномики для оценки уровня экспрессии генов по анализу регуляторных мотивов в последовательностях ДНК не очень велики (для эукариот, с бактериями все проще), а ожидать массового потока данных по транскриптомам эмбрионов китов различных видов (для сравнительного анализа) было бы слишком оптимистично.

Анатомия

Одной из самых ярких анатомических адаптаций китов стало развитие ласт, сопровождавшееся существенной редукцией скелета конечностей. Парадоксальным образом этому процессу предшествовало восстановление пальцев, утраченных копытными предшественниками. И действительно, ген *Hox12*, контролирующий у млекопитающих развитие конечностей и пальцев, находится у китов под действием сильного положительного отбора, а удлинение полиаланинового тракта в гене *Hox13* из той же регуляторной сети, наблюдающееся у китов, напоминает аналогичную мутацию у человека, ведущую к полидактилии [58]. У дельфинов обнаружались следы действия положительного отбора в гене *Hox9*, от которого также зависит развитие передних конечностей [59]. При тотальном анализе генома дельфина последствия положительного отбора были найдены в генах, отвечающих за сегментацию тела [57], мышечные сокращения [44] и развитие сердечно-сосудистой системы, легких и кожи [37].

Потеря оволосения может быть связана с изменением работы двух ключевых регуляторов роста волосяных фолликулов — генов *Hr* и *FGF5* [60]. Удивительно, но изменения произошли в противоположную сторону: *FGF5* быстро эволюционировал, а *Hr* превратился в псевдоген. Впрочем, это согласуется с сигнальной ролью этих факторов: изменившийся *FGF5*, видимо, останавливает рост волос и переводит фолликулы в стадию восстановления, а отсутствие работающего *Hr* приводит к нарушениям в этой стадии. Псевдогенами стали также многие гены β -кератинов, основных белков волос [61]. У усатых китов потеря зубов, похоже, сопровождалась превращением генов, кодирующих структурные белки зубной эмали энамелин и амелобластин, в псевдогены [62].

Физиология

В связи с переходом китов к морскому образу жизни естественно было ожидать приспособления к новой среде у аквапоринов и других белков, участвующих в осмотической регуляции. Анализ семи аквапориновых генов показал действие положительного отбора на ген аквапорина-2, специфического для ветви китов. У других аквапори-

нов действие положительного отбора завершилось до отделения китов от парнокопытных [63]. Изменения в аквапорине-2 и транспортере мочевины UT-A2 могут быть связаны с транспортом воды и мочевины, способствуя более высокой концентрации мочевины в моче и экономии воды [64]. В свою очередь, изменения в ангиотензиногене и ангиотензин-конвертирующем ферменте, по-видимому, связаны с необходимостью поддержания водно-солевого баланса в гиперосмотической среде [65].

Молекулярным коррелятом приспособления к более эффективному переносу кислорода стали параллельные замены и положительный отбор, который действует не только на миоглобин, но и на α - и β -гемоглобины (перенос кислорода в крови), а также на регуляторы тонуса сосудов и сокращения их стенок: эндотелины-1, -2 и -3, рецепторы эндотелина типов А и В, адренергический рецептор α -1D и антидиуретический гормон [66].

Положительный отбор, действующий на мембранную часть сурфактантного белка С, мог способствовать приспособлению легких к циклу сжатий–раздуваний, важному для глубокого погружения при нырянии [67].

У дельфина последствия положительного отбора обнаружались в генах, участвующих в транспорте и метаболизме глюкозы и липидов, в том числе в митохондриях [37, 44], а также в трансмембранной α -спирали второй субъединицы митохондриальной NADH-дегидрогеназы, возможно, задействованной в поддержании осмотического баланса митохондрий; в последнем случае наблюдались также многочисленные параллельные замены предкового аланина или валина на тирозин [68]. Замены в гене цитохрома *b* могли повлиять на эффективность энергетических процессов [69].

Микробиом и иммунитет

Новая водная среда и рацион — рыба, планктон — требовали и совершенно иного набора симбиотических бактерий. Анализ бактериального сообщества дельфинов показал существенное число уникальных видов по сравнению с наземными родственниками [70]. У усатых китов обнаружилась смесь видов бактерий, характерных для хищников и травоядных [71]. Авторы объясняют это особенностями диеты: пути катаболизма белков и затем аминокислот, характерные для хищников, должны работать при питании рыбой, а пути катаболизма полисахаридов — при питании планктонными ракообразными, имеющими хитиновую оболочку. Впрочем, последнее предположение выглядит странно: катаболизм хитина, особенно на первых стадиях, существенно отличается от катаболизма полисахаридов, составляющих клеточную стенку растений, например целлюлозы, общая же часть

этих метаболических путей относится к центральному метаболизму и присутствует практически у всех бактерий.

Как бы то ни было, быстрая адаптация к новым, морским, микробиомам потребовала и эволюции генов иммунной системы. Toll-подобные рецепторы, узнающие липополисахариды, формируют первую линию взаимодействия с бактериями. Оказалось, что некоторые участки гена *TLR4*, кодирующего одного из представителей семейства этих рецепторов, изменяются существенно быстрее, чем при случайном дрейфе, и в них происходят параллельные, т.е. одинаковые, замены в разных эволюционных линиях [72]. Это служит свидетельством положительного отбора. Более того, выяснилось, что особенно сильно эволюция ускорилась во время перехода от сухопутного образа жизни к полуводному у общего предка китов и гиппопотамов и во время перехода к полностью водному образу жизни у предка китов. Моделирование пространственной структуры рецептора показывает, что приобретенные замены могут влиять на его взаимодействие с другими белками, участвующими в распознавании липополисахаридов, а стало быть, на иммунитет к грамотрицательным бактериям [73]. При этом у зубатых китов были потеряны гены *Mx1* и *Mx2*, отвечающие за противовирусный иммунитет [74] (рис.6).

* * *

Перечисленные в этом обзоре наблюдения носят достаточно отрывочный характер по трем причинам. Во-первых, нынешний уровень понимания того, как генетическая информация преобразуется в анатомические и физиологические особенности, явно недостаточен для систематического исследования функциональных систем организма и их эволюции. Во-вторых, для такого исследования не хватает данных — полностью секвенированных геномов ныне живущих китов, а тем более транскриптомов отдельных тканей и органов, желательного на разных стадиях развития. В-третьих, вполне вероятно, что разнообразие ныне живущих видов может оказаться недостаточно для полной эволюционной реконструкции событий, произошедших между разделением ветвей китов и гиппопотамов и разделением китов на основные современные ветви, ведь именно в эти 30 млн лет происходили основные морфологические изменения.

В заключение стоит отметить, что анализ геномов не только проливает свет на эволюцию китов, но и позволяет находить новые ныне живущие виды. В конце 1970-х годов японские китобойи «поймали» восемь китов ранее неизвестного вида, похожих на финвалов. (Так деликатно написано в статье японских же авторов [75], на самом деле китов убили, потому что Япония — одна из немногих стран, до сих пор активно занимающаяся китобойным промыслом под вывеской научных ис-

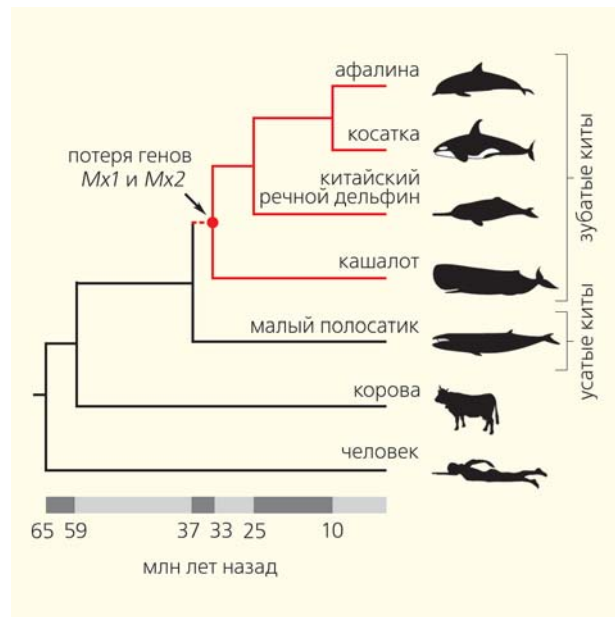


Рис.6. Филогенетическое дерево китов по отношению к корове и человеку, демонстрирующее потерю зубатыми китами генов *Mx1* и *Mx2*, кодирующих белки, которые участвуют в противовирусном иммунитете [74]. Предполагаемое место потери этих генов отмечено пунктирной линией и стрелкой. Ветви с утраченными генами показаны красными линиями.

следований.) Туша животного того же вида была выброшена на берег в 1998 г. Спустя пять лет, в 2003 г., анализ геномных последовательностей и характерных анатомических особенностей позволил описать новый вид — полосатика Омуры (*Balaenoptera omurai*). Именно молекулярные свидетельства стали решающими в определении того, не относятся ли эти особи к уже известному виду — полосатикам Брайда (*B. edeni*). Одновременно разрешилось и существовавшее в литературе противоречие — относятся ли киты Брайда к одному виду или к двум (*B. edeni* и *B. brydei*). Оказалось, что к двум.

А самая свежая находка была сделана в июле этого года [76]. До сих пор были известны два вида клюворылых китов рода *Berardius* — клюворыл Бэрда, или северный плавун, живущий в северной части Тихого океана, и клюворыл Арну, или южный плавун, из Антарктики. Японские китобойи знали о существовании редкой черной разновидности северных китов, имели для нее отдельное название «карасу» («ворон»), но не считали отдельным видом. Однако анализ митохондриальных геномов почти двух сотен китов Бэрда, в том числе и выделенных из музейных скелетов и китового мяса с японских рынков, позволил установить, что между черными китами и обычными серыми больше различий, чем между серыми и китами Арну. Это означает, что черные киты тоже должны рассматриваться как

отдельный вид. Кстати, среди авторов статьи были и трое российских ученых — сотрудники биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоно-

сова И.Д.Федутин и О.А.Филатова и А.М.Бурдин из Камчатского филиала Тихоокеанского института географии ДВО РАН. ■

Автор благодарен фонду «Эволюция» за поддержку научно-популярных лекций, подготовка к которым помогла лучше осознать изложенный материал.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-24-00155).

Литература

1. *Beddard F.E.* A book of whales. N.Y., 1900.
2. *O'Leary M.A., Geisler J.H.* The position of Cetacea within mammalia: phylogenetic analysis of morphological data from extinct and extant taxa // *Syst. Biol.* 1999. V.48. P.455–490.
3. *Arnason U., Gullberg A., Janke A.* Mitogenomic analyses provide new insights into cetacean origin and evolution // *Gene.* 2004. V.333. P.27–34. Doi:10.1016/j.gene.2004.02.010.
4. *Graur D., Higgins D.G.* Molecular evidence for the inclusion of cetaceans within the order Artiodactyla // *Mol. Biol. Evol.* 1994. V.11. P.357–364.
5. *Irwin D.M., Arnason U.* Cytochrome *b* gene of marine mammals: phylogeny and evolution // *J. Mammal. Evol.* 1994. V.2. P.37–55. Doi:10.1007/BF01464349.
6. *Gatesy J., Hayashi C., Cronin M.A. et al.* Evidence from milk casein genes that cetaceans are close relatives of hippopotamid artiodactyls // *Mol. Biol. Evol.* 1996. V.13. P.954–963.
7. *Gatesy J.* More DNA support for a Cetacea/Hippopotamidae clade: the blood-clotting protein gene gamma-fibrinogen // *Mol. Biol. Evol.* 1997. V.14. P.537–543.
8. *Gatesy J., Milinkovitch M., Waddell V. et al.* Stability of cladistic relationships between Cetacea and higher-level artiodactyl taxa // *Syst. Biol.* 1999. V.48. P.6–20.
9. *Kleineidam R.G., Pesole G., Breukelman H.J. et al.* Inclusion of cetaceans within the order Artiodactyla based on phylogenetic analysis of pancreatic ribonuclease genes // *J. Mol. Evol.* 1999. V.48. P.360–368.
10. *Hasegawa M., Adachi J.* Phylogenetic position of cetaceans relative to artiodactyls: reanalysis of mitochondrial and nuclear sequences // *Mol. Biol. Evol.* 1996. V.13. P.710–717.
11. *Montgelard C., Catzefflis F.M., Douzery E.* Phylogenetic relationships of artiodactyls and cetaceans as deduced from the comparison of cytochrome *b* and 12S rRNA mitochondrial sequences // *Mol. Biol. Evol.* 1997. V.14. P.550–559.
12. *Ursing B.M., Arnason U.* Analyses of mitochondrial genomes strongly support a hippopotamus-whale clade // *Proc. Biol. Sci.* 1998. V.265. P.2251–2255. Doi:10.1098/rspb.1998.0567.
13. *Gatesy J., Geisler J.H., Chang J. et al.* A phylogenetic blueprint for a modern whale // *Mol. Phylogenet. Evol.* 2013. V.66. P.479–506. Doi:10.1016/j.ympev.2012.10.012.
14. *Shimamura M., Yasue H., Ohshima K. et al.* Molecular evidence from retroposons that whales form a clade within even-toed ungulates // *Nature.* 1997. V.388. P.666–670. Doi:10.1038/41759.
15. *Shimamura M., Abe H., Nikaido M. et al.* Genealogy of families of SINEs in cetaceans and artiodactyls: the presence of a huge superfamily of tRNA(Glu)-derived families of SINEs // *Mol. Biol. Evol.* 1999. V.16. P.1046–1060.
16. *Nikaido M., Rooney A.P., Okada N.* Phylogenetic relationships among cetartiodactyls based on insertions of short and long interspersed elements: hippopotamuses are the closest extant relatives of whales // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1999. V.96. P.10261–10266.
17. *Zhou X., Xu S., Yang Y. et al.* Phylogenomic analyses and improved resolution of Cetartiodactyla // *Mol. Phylogenet. Evol.* 2011. V.61. P.255–264. Doi:10.1016/j.ympev.2011.02.009.
18. *Hassanin A., Delsuc F., Ropiquet A. et al.* Pattern and timing of diversification of Cetartiodactyla (Mammalia, Laurasiatheria), as revealed by a comprehensive analysis of mitochondrial genomes // *C. R. Biol.* 2012. V.335. P.32–50. Doi:10.1016/j.crv.2011.11.002.
19. *Thewissen J.G., Madar S.I.* Ankle morphology of the earliest Cetaceans and its implications for the phylogenetic relations among ungulates // *Syst. Biol.* 1999. V.48. P.21–30.
20. *Thewissen J.G., Cooper L.N., Clementz M.T. et al.* Whales originated from aquatic artiodactyls in the Eocene epoch of India // *Nature.* 2007. V.450. P.1190–1194. Doi:10.1038/nature06343.
21. *Thewissen J.G., Williams E.M., Roe L.J. et al.* Skeletons of terrestrial cetaceans and the relationship of whales to artiodactyls // *Nature.* 2001. V.413. P.277–281. Doi:10.1038/35095005.
22. *Geisler J.H., Theodor J.M.* Hippopotamus and whale phylogeny // *Nature.* 2009. V.458. E1–E4. Doi:10.1038/nature07776.
23. *Gingerich P.D., Haq M., Zalmout I.S. et al.* Origin of whales from early artiodactyls: hands and feet of Eocene Protocetidae from Pakistan // *Science.* 2001. V.293. P.2239–2242. Doi:10.1126/science.1063902.

24. McGowen M.R., Gatesy J., Wildman D.E. Molecular evolution tracks macroevolutionary transitions in Cetacea // Trends Ecol. Evol. 2014. V.29. P.336–346. Doi:10.1016/j.tree.2014.04.001.
25. Zhou X., Sun F., Xu S. et al. Baiji genomes reveal low genetic variability and new insights into secondary aquatic adaptations // Nat. Commun. 2013. V.4. P.2708. Doi:10.1038/ncomms3708.
26. Yin H.S., Cho Y.S., Guang X. et al. Minke whale genome and aquatic adaptation in cetaceans // Nat. Genet. 2014. V.46. P.88–92. Doi:10.1038/ng.2835.
27. Kooyman G.L., Ponganis P.J. The physiological basis of diving to depth: birds and mammals // Annu. Rev. Physiol. 1998. V.60. P.19–32.
28. Dolar M.L., Suarez P., Ponganis P.J. et al. Myoglobin in pelagic small cetaceans // J. Exp. Biol. 1999. V.202. P.227–236.
29. Helbo S., Fago A. Functional properties of myoglobins from five whale species with different diving capacities // J. Exp. Biol. 2012. V.215. P.3403–3410. Doi:10.1242/jeb.073726.
30. Noren S.R., Williams T.M. Body size and skeletal muscle myoglobin of cetaceans: adaptations for maximizing dive duration // Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol. 2000. V.126. P.181–191. Doi:10.1016/S1095-6433(00)00182-3.
31. Dasmeh P., Kepp K.P. Bridging the gap between chemistry, physiology, and evolution: quantifying the functionality of sperm whale myoglobin mutants // Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol. 2012. V.161. P.9–17. Doi:10.1016/j.cbpa.2011.07.027.
32. Holm J., Dasmeh P., Kepp K.P. Tracking evolution of myoglobin stability in cetaceans using experimentally calibrated computational methods that account for generic protein relaxation // Biochim. Biophys. Acta. 2016. V.1864. P.825–834. Doi:10.1016/j.bbapap.2016.04.004.
33. Nery M.F., Arroyo J.J., Opazo J.C. Accelerated evolutionary rate of the myoglobin gene in long-diving whales // J. Mol. Evol. 2013. V.76. P.380–387. Doi:10.1007/s00239-013-9572-1.
34. Mirceta S., Signore A.V., Burns J.M. et al. Evolution of mammalian diving capacity traced by myoglobin net surface charge // Science. 2013. V.340. P.1234192. Doi:10.1126/science.1234192.
35. Schmeuer M., Flachsbarth S., Czech-Damal N.U. et al. Neuroglobin of seals and whales: evidence for a divergent role in the diving brain // Neuroscience. 2012. V.223. P.35–44. Doi:10.1016/j.neuroscience.2012.07.052.
36. McGowen M.R., Montgomery S.H., Clark C. et al. Phylogeny and adaptive evolution of the brain-development gene microcephalin (*MCPH1*) in cetaceans // BMC Evol. Biol. 2011. V.11. P.98. Doi:10.1186/1471-2148-11-98.
37. McGowen M.R., Grossman L.L., Wildman D.E. Dolphin genome provides evidence for adaptive evolution of nervous system genes and a molecular rate slowdown // Proc. Biol. Sci. 2012. V.279. P.3643–3651. Doi:10.1098/rspb.2012.0869.
38. Li Y., Liu Z., Shi P. et al. The hearing gene *Prestin* unites echolocating bats and whales // Curr. Biol. 2010. V.20. R55–R56. Doi:10.1016/j.cub.2009.11.042.
39. Liu Y., Cotton J.A., Shen B. et al. Convergent sequence evolution between echolocating bats and dolphins // Curr. Biol. 2010. V.20. R53–R54. Doi:10.1016/j.cub.2009.11.058.
40. Davies K.T., Cotton J.A., Kirwan J.D. et al. Parallel signatures of sequence evolution among hearing genes in echolocating mammals: an emerging model of genetic convergence // Heredity. 2012. V.108. P.480–489. Doi:10.1038/hdy.2011.119.
41. Xu H., Liu Y., He G. et al. Adaptive evolution of tight junction protein claudin-14 in echolocating whales // Gene. 2013. V.530. P.208–214. Doi:10.1016/j.gene.2013.08.034.
42. Shen Y.Y., Liang L., Li G.S. et al. Parallel evolution of auditory genes for echolocation in bats and toothed whales // PLoS Genet. 2012. V.8. e1002788. Doi:10.1371/journal.pgen.1002788.
43. Liu Y., Rossiter S.J., Han X. et al. Cetaceans on a molecular fast track to ultrasonic hearing // Curr. Biol. 2010. V.20. P.1834–1839. Doi:10.1016/j.cub.2010.09.008.
44. Sun Y.B., Zhou W.P., Liu H.Q. et al. Genome-wide scans for candidate genes involved in the aquatic adaptation of dolphins // Genome Biol. Evol. 2013. V.5. P.130–139. Doi:10.1093/gbe/evs123.
45. McGowen M.R., Clark C., Gatesy J. The vestigial olfactory receptor subgenome of odontocete whales: phylogenetic congruence between gene-tree reconciliation and supermatrix methods // Syst. Biol. 2008. V.57. P.574–590. Doi:10.1080/10635150802304787.
46. Feng P., Zheng J., Rossiter S.J. et al. Massive losses of taste receptor genes in toothed and baleen whales // Genome Biol. Evol. 2014. V.6. P.1254–1265. Doi:10.1093/gbe/evu095.
47. Zhu K., Zhou X., Xu S. The loss of taste genes in cetaceans // BMC Evol. Biol. 2014. V.14. P.218. Doi:10.1186/s12862-014-0218-8.
48. Kishida T., Thewissen J., Hayakawa T. et al. Aquatic adaptation and the evolution of smell and taste in whales // Zoological Lett. 2015. V.13. P.9. Doi:10.1186/s40851-014-0002-z.
49. Fasick J.I., Robinson P.R. Mechanism of spectral tuning in the dolphin visual pigments // Biochemistry. 1998. V.37. P.433–438. Doi:10.1021/bi972500j.
50. Fasick J.I., Robinson P.R. Spectral-tuning mechanisms of marine mammal rhodopsins and correlations with foraging depth // Vis. Neurosci. 2000. V.17. P.781–788.

51. *Dungan S.Z., Kosyakov A., Chang B.S.* Spectral tuning of killer whale (*Orcinus orca*) rhodopsin: evidence for positive selection and functional adaptation in a cetacean visual pigment // *Mol. Biol. Evol.* 2016. V.33. P.323–336. Doi:10.1093/molbev/msv217.
52. *Newman L.A., Robinson P.R.* Cone visual pigments of aquatic mammals // *Vis. Neurosci.* 2005. V.22. P.873–879. Doi:10.1017/S0952523805226159.
53. *Fasick J.I., Cronin T.W., Hunt D.M. et al.* The visual pigments of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) // *Vis. Neurosci.* 1998. V.15. P.643–651.
54. *Levenson D.H., Dizon A.* Genetic evidence for the ancestral loss of short-wavelength-sensitive cone pigments in mysticete and odontocete cetaceans // *Proc. Biol. Sci.* 2003. V.270. P.673–679. Doi:10.1098/rspb.2002.2278.
55. *Meredith R.W., Gatesy J., Emerling C.A. et al.* Rod monochromacy and the coevolution of cetacean retinal opsins // *PLoS Genet.* 2013. V.9. e1003432. Doi:10.1371/journal.pgen.1003432.
56. *Schweikert L.E., Fasick J.I., Grace M.S.* Evolutionary loss of cone photoreception in balaenid whales reveals circuit stability in the mammalian retina // *J. Comp. Neurol.* 2016. V.524. P.2873–2885. Doi:10.1002/cne.23996.
57. *Nery M.F., González D.J., Opazo J.C.* How to make a dolphin: molecular signature of positive selection in cetacean genome // *PLoS One.* 2013. V.8. e65491. Doi:10.1371/journal.pone.0065491.
58. *Wang Z., Yuan L., Rossiter S.J. et al.* Adaptive evolution of 5'*HoxD* genes in the origin and diversification of the cetacean flipper // *Mol. Biol. Evol.* 2009. V.26. P.613–622. Doi:10.1093/molbev/msn282.
59. *Liang L., Shen Y.Y., Pan X.W. et al.* Adaptive evolution of the *Hox* gene family for development in bats and dolphins // *PLoS One.* 2013. V.8. e65944. Doi:10.1371/journal.pone.0065944.
60. *Chen Z., Wang Z., Xu S. et al.* Characterization of hairless (*Hr*) and *FGF5* genes provides insights into the molecular basis of hair loss in cetaceans // *BMC Evol. Biol.* 2013. V.13. P.34. Doi:10.1186/1471-2148-13-34.
61. *Nery M.F., Arroyo J.I., Opazo J.C.* Increased rate of hair keratin gene loss in the cetacean lineage // *BMC Genomics.* 2014. V.15. P.869. Doi:10.1186/1471-2164-15-869.
62. *Deméré T.A., McGowen M.R., Berta A. et al.* Morphological and molecular evidence for a stepwise evolutionary transition from teeth to baleen in mysticete whales // *Syst. Biol.* 2008. V.57. P.15–37. Doi:10.1080/10635150701884632.
63. *São Pedro S.L., Alves J.M., Barreto A.S. et al.* Evidence of positive selection of aquaporins genes from *Pontoporia blainvillei* during the evolutionary process of cetaceans // *PLoS One.* 2015. V.10. e0134516. Doi:10.1371/journal.pone.0134516.
64. *Wang J., Yu X., Hu B. et al.* Physicochemical evolution and molecular adaptation of the cetacean osmoregulation-related gene *UT-A2* and implications for functional studies // *Sci. Rep.* 2015. V.5. P.8795. Doi:10.1038/srep08795.
65. *Xu S., Yang Y., Zhou X. et al.* Adaptive evolution of the osmoregulation-related genes in cetaceans during secondary aquatic adaptation // *BMC Evol. Biol.* 2013. V.13. P.189. Doi:10.1186/1471-2148-13-189.
66. *Tian R., Wang Z., Niu X. et al.* Evolutionary genetics of hypoxia tolerance in cetaceans during diving // *Genome Biol. Evol.* 2016. V.8. P.827–839. Doi:10.1093/gbe/evw037.
67. *Foot N.J., Orgeig S., Donnellan S.* Positive selection in the N-terminal extramembrane domain of lung surfactant protein C (SP-C) in marine mammals // *J. Mol. Evol.* 2007. V.65. P.12–22. Doi:10.1007/s00239-006-0083-1.
68. *Caballero S., Duchêne S., Garavito M.F. et al.* Initial evidence for adaptive selection on the NADH subunit two of freshwater dolphins by analyses of mitochondrial genomes // *PLoS One.* 2015. V.10. e0123543. Doi:10.1371/journal.pone.0123543.
69. *McClellan D.A., Palfreyman E.J., Smith M.J. et al.* Physicochemical evolution and molecular adaptation of the cetacean and artiodactyl cytochrome *b* proteins // *Mol. Biol. Evol.* 2005. V.22. P.437–455. Doi:10.1093/molbev/msi028.
70. *Bik E.M., Costello E.K., Switzer A.D. et al.* Marine mammals harbor unique microbiotas shaped by and yet distinct from the sea // *Nat. Commun.* 2016. V.7. P.10516. Doi:10.1038/ncomms10516.
71. *Sanders J.G., Beichman A.C., Roman J. et al.* Baleen whales host a unique gut microbiome with similarities to both carnivores and herbivores // *Nat. Commun.* 2015. V.6. P.8285. Doi:10.1038/ncomms9285.
72. *Shen T., Xu S., Wang X. et al.* Adaptive evolution and functional constraint at TLR4 during the secondary aquatic adaptation and diversification of cetaceans // *BMC Evol. Biol.* 2012. V.12. P.39. Doi:10.1186/1471-2148-12-39.
73. *Sbshido R., Obishi K., Suzuki R. et al.* Cetacean Toll-like receptor 4 and myeloid differentiation factor 2, and possible cetacean-specific responses against gram-negative bacteria // *Comp. Immunol. Microbiol. Infect. Dis.* 2010. V.33. e89–e98. Doi:10.1016/j.cimid.2010.03.003.
74. *Braun B.A., Marcovitz A., Camp J.G. et al.* Mx1 and Mx2 key antiviral proteins are surprisingly lost in toothed whales // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2015. V.30. P.8036–8040. Doi:10.1073/pnas.1501844112.
75. *Wada S., Oishi M., Yamada T.K.* A newly discovered species of living baleen whale // *Nature.* 2003. V.426. P.278–281. Doi:10.1038/nature02103.
76. *Morin P.A., Baker C.S., Brewer R.S. et al.* Genetic structure of the beaked whale genus *Berardius* in the North Pacific, with genetic evidence for a new species // *Marine Mammal. Science.* 2016. Doi:10.1111/mms.12345.

В погоне за гибридной сельдью

П.П.Стрелков, Д.Л.Лайус, Р.О.Вайнола

В начале весны, во время полнолуния, в норвежском Балсфиорде в течение нескольких дней можно наблюдать интересное природное явление. Сперва с моря слетаются тучи птиц. Потом вода начинает бурлить от множества рыб. Поблескивая серебряными боками, они иногда выпрыгивают наружу, а птицы на них охотятся. При отливе видны литоральные водоросли, покрытые рыбьей икрой. Так нерестится сельдь Балсфиорда.

На первый взгляд, нет ничего удивительного в том, что в норвежских водах в начале весны нерестится океаническая норвежская сельдь (род *Clupea*) — крупнейшая популяция рыб во всей Северной Атлантике. Однако норвежская сельдь, как и любая другая популяция атлантической сельди, размножается скрытно, на глубине, и с берега этот процесс не увидеть. На литорали в норме нерестится другой вид — тихоокеанская сельдь.

В Северном полушарии встречаются два вида рода *Clupea*: атлантическая сельдь (*C.barengus*), или многопозвонковая, и тихоокеанская (*C.pallasii*), или малопозвонковая. Атлантическая сельдь обитает повсеместно в Северной Атлантике, а тихоокеанская — в Северной Пацифике, а также в Белом море (подвид беломорская сельдь *C.pallasii marisalbi*) и в юго-вос-



Петр Петрович Стрелков, кандидат биологических наук, доцент кафедры ихтиологии и гидробиологии Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов — эволюционная и морская биология.



Дмитрий Людвигович Лайус, кандидат биологических наук, доцент той же кафедры. Научные интересы связаны с популяционной биологией, ихтиологией, исторической экологией, устойчивым рыболовством.



Ристо Олави Вайнола, PhD, PI, старший куратор Музея естественной истории Финляндии Хельсинкского университета. Занимается зоогеографией, молекулярной систематикой, популяционной генетикой, исследованием водной фауны.

Ключевые слова: атлантическая сельдь, тихоокеанская сельдь, Северная Европа, гибридизация, интрогрессия.

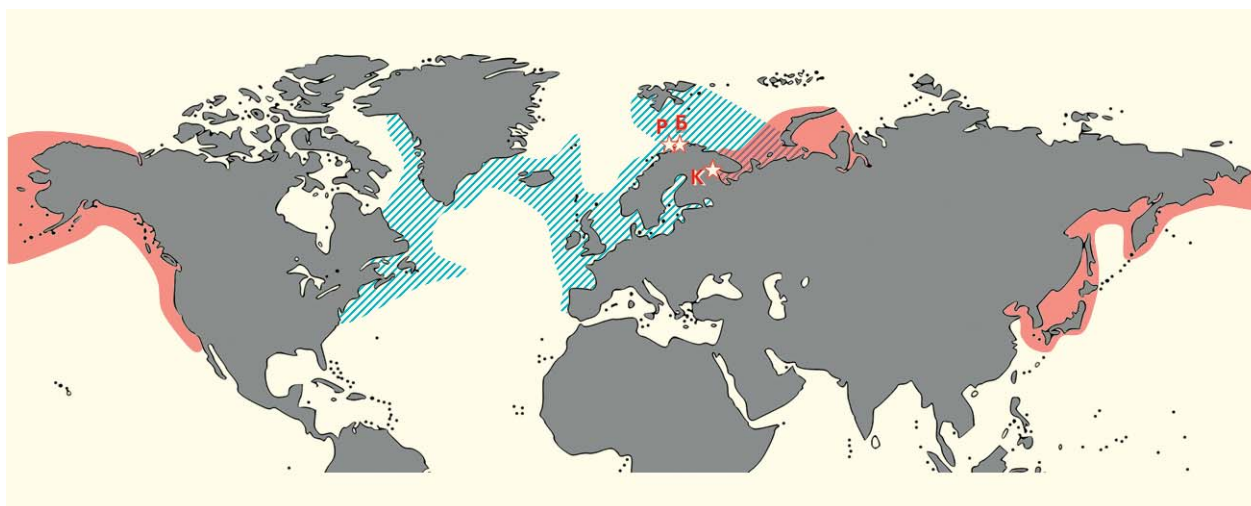
Key words: atlantic herring, pacific herring, Northern Europe, hybridization, introgression.

© Стрелков П.П., Лайус Д.Л., Вайнола Р.О., 2016



«Летучая» сельдь. Такое характерное поведение рыбы связано с тем, что птицы атакуют косяк не только с воздуха, но и из-под воды. Йоканьгская губа, Россия.

Фото Е.А.Генельт-Яновского



Распространение сельдей рода *Clupea* в Северном полушарии. Ареал атлантической сельди показан голубым цветом, тихоокеанской — розовым. Звездочками отмечены Россфиорд (Р), Балсфиорд (Б) и Кандалакша (К).

точных районах Баренцева моря (подвид чешско-печорская сельдь *C. pallasii suworowi*). В Белое и Печорское моря заходит во время нагульных миграций также и *C. barentus*, но, как считается, не нерестится там. Балсфиорд находится примерно в 1000 км от известной западной границы распространения тихоокеанской сельди. Морфологические (например, число позвонков: в среднем 53 у *C. pallasii* и 57 у *C. barentus*), физиологические, поведенческие различия двух видов частично скрадываются высокой внутривидовой изменчивостью. Однако только тихоокеанская сельдь умеет нереститься на мелководье.

Птицы летят

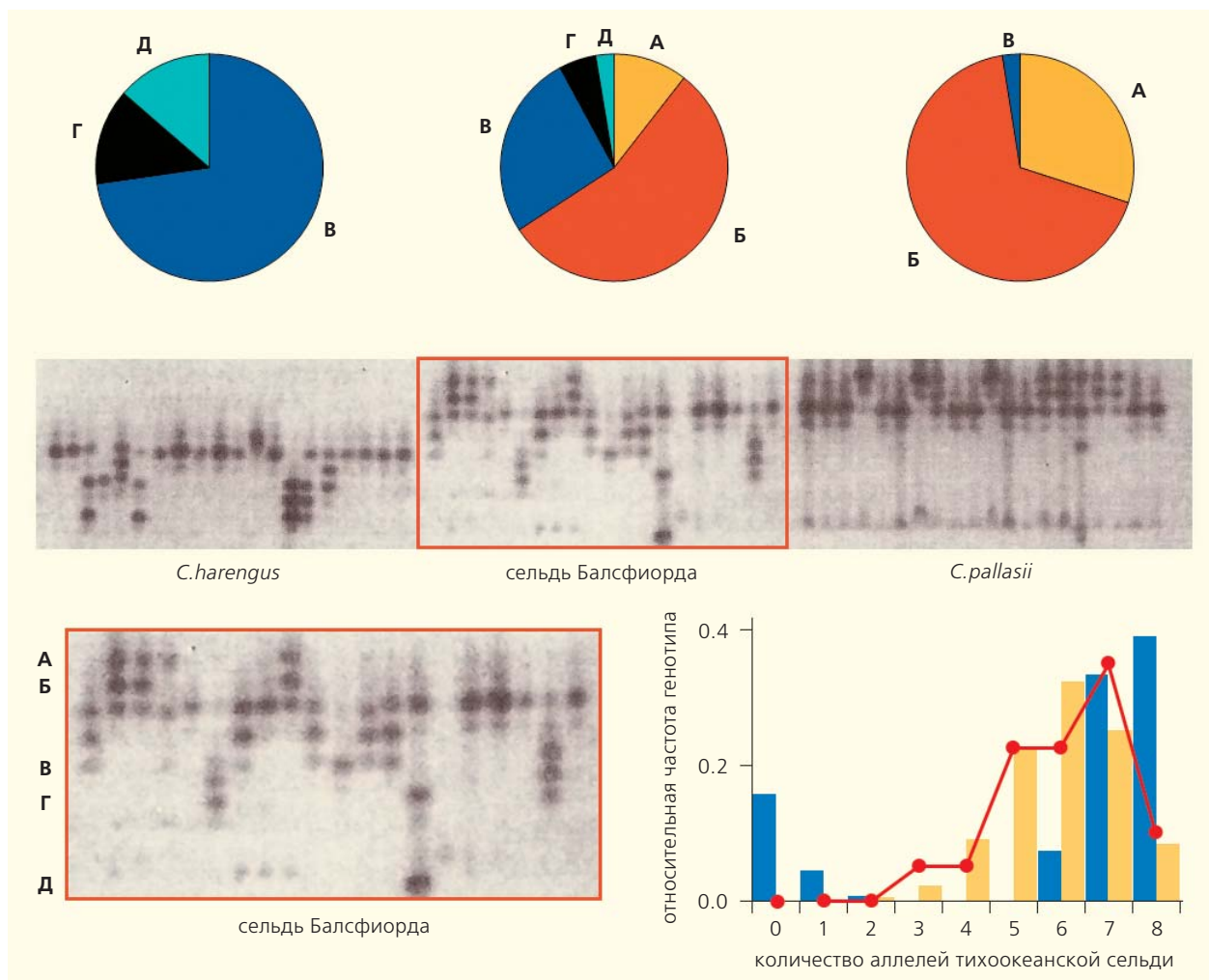
Конечно же, очень интересно изучить эту сельдь генетически, чтобы выяснить ее таксономическую принадлежность. Наша коллега Ханна Лаакконен потратила много сил и времени, чтобы за-

получить для этой цели выборку сельди во время нереста в Балсфиорде. В первый год она приехала туда в нужное время и нашла икру, а сельди уже не было, в следующий год просидела на берегу две недели, а сельдь так и не появилась. Ханна решила, что эта рыба неуловима. Во время поездки она подружилась с рыбаком, чей дом стоит на берегу Балсфиорда. Прошел год, как вдруг на телефоне Ханны высветился норвежский номер. Человек что-то возбужденно кричал по-норвежски, она смогла разобрать только: «птицы летят, птицы летят». Это был тот самый знакомый рыбак Ханны. Она попала в затруднительное положение: в Балсфиорде нерестится сельдь, и она рада бы за ней отправиться, но не была к этому готова. Вот здесь и пригодились русские коллеги. На следующий день в аэропорту Тромсё Ханну встречал на машине А.Ю.Воронков — наш добрый коллега и резидент Тромсё. Сжимая в руках жаберную сеть, они погнались в Балсфиорд. На этот раз улов удался.



Ханна Лаакконен и норвежский рыбак Оддвар Скогли добывают для анализа «неуловимую» сельдь в Балсфиорде.

Фото А.Ю.Воронкова



Результаты генетического анализа сельдей — типичной атлантической, типичной тихоокеанской и обитающей в Балсфиорде [1]. В середине рисунка представлена электрофореграмма аллозимов (продуктов аллелей гена фермента) глюкозо-6-фосфатизомеразы-2 (Gri-2) этих рыб. Внизу слева отдельно приведен в увеличенном виде участок фореграммы сельди из Балсфиорда; буквами обозначены зоны экспрессии разных аллелей (т.е. аллозимы Gri-2) А—Д. Гомозиготы проявляются как одна точка, гетерозиготы — как три, поскольку фермент представляет собой димер. На диаграммах (вверху) даны частоты аллелей Gri-2 в выборках, разный цвет соответствует разным аллелям; внизу справа — распределения частот четырехлокусных генотипов в изученной нами выборке сельди из Балсфиорда — наблюдаемое (красный цвет) и ожидаемые: голубой — для смеси с частотами аллелей как в эмпирической выборке из Россфиорда; желтый — для панмиктической популяции [2]. Эти теоретические распределения помогают визуально оценить масштаб гибридизации.

Мы выполнили генетический анализ их улова — электрофоретически* изучили аллельные формы (аллозимы) фермента глюкозо-6-фосфатизомеразы-2 (Gri-2). То, что мы увидели, ничем не

* Электрофорез — давно применяемый метод, которым обычно разделяют варианты (аллозимы) полиморфного фермента, кодируемые разными аллелями его гена, по электрическому заряду белковой цепи. С помощью этого классического метода в 1980-х годах был сформулирован молекулярно-генетический диагноз видов сельди. Наиболее широкое применение аллозимы нашли в качестве надежных генных маркеров в популяционной генетике для исследования генетической изменчивости природных популяций и видов.

отличалось от результатов, полученных, например, норвежскими учеными — Куртом Йорстадом с соавторами [1].

Норвежскими авторами представлены результаты электрофореза глюкозо-6-фосфатизомеразы-2 трех выборок рыб: типичной атлантической сельди, типичной тихоокеанской и сельди из Балсфиорда. Судя по электрофореграмме, для атлантической сельди характерен один набор аллелей**, для тихоокеанской — другой, а у сельди из Балсфи-

** Далее, поскольку речь идет о генотипах сельдей, вместо аллозимов будем употреблять слово «аллели», так как они кодируют разные формы фермента.

орда присутствуют и те и другие в соотношении «атлантических» и «тихоокеанских» примерно как 1:4. Мы изучили еще три гена: лактатдегидрогеназ-1 и -2 (Ldh-1 и -2) и малатдегидрогеназы-4 (Mdh-4) и получили такую же картину распределения их аллелей.

Возникает вопрос: эти «тихоокеанские» и «атлантические» аллели случайным образом перемешаны в генотипах рыб, либо у одних особей сочетаются аллели одного вида, а у других — другого? В последнем случае можно заключить, что в сети Йорстада, равно как и в сети Ханны, попала смесь сельдей двух видов.

Зная частоты аллелей у сельдей из Балсфиорда, у тихоокеанской и атлантической, мы смоделировали для нашей выборки два теоретически ожидаемых распределения частот генотипов. Одно из них относится к панмиктической (свободно скрещивающейся) популяции, другое — к выборке, представленной смесью особей двух видов. Когда мы сравнили ожидаемое с наблюдаемым, оказалось, что эмпирическое распределение статистически не отличается от ожидаемого для панмиктической популяции. Из этого мы делаем вывод: «тихоокеанские» и «атлантические» аллели случайным образом перемешаны в генотипах рыб.

30 лет ученые спорили, как интерпретировать генетические особенности сельди из Балсфиорда. Согласно одной гипотезе, это уклонившаяся популяция атлантической сельди; согласно другой, это популяция, родственная тихоокеанской сельди. Наши предшественники, бывшие хорошими зоологами, накрепко усвоили популярную в 1970–1980-х годах концепцию вида, известную как «биологическая». В соответствии с ней, виды — это репродуктивно изолированные сообщества особей, а те популяции, которые способны к интрогрессивной гибридизации (т.е. идущей дальше первого поколения), не виды. Поскольку тихоокеанская и атлантическая сельди выглядят как разные виды, то генетическая конституция сельди из Балсфиорда казалась исследователям необъяснимой. Но никто никогда не высказывал гипотезу о том, что эта рыба — продукт межвидовой гибридизации. Однако именно такой точки зрения придерживаемся мы — на основе своих результатов.

Мы изучали белковый полиморфизм, кодируемый ядерными генами, а исследование, которым занималась наша коллега Ханна, в первую очередь касалось митохондриальной (мт) изменчивости. Из результатов проведенной работы следовало, что уровень различий между мт-геномами *C.pallasii* и *C.barengus* соответствует ожидаемому для разных видов рыб [3]. За такими различиями стоят сотни тысяч лет независимой эволюции. В выборке же из Балсфиорда одни рыбы несли «тихоокеанские» митохондрии, другие — «атлантические». Соотношение рыб с этими органеллами двух видов было примерно таким же, что и «видоспецифических» аллелей аллозимов. Этот результат не

оставляет сомнений в гибридном происхождении сельди из Балсфиорда. Как еще можно объяснить сосуществование митохондрий разных видов в одной популяции, кроме как не гибридизацией?

Сельдь на Ивана Купала и сельдь Юрьева дня

Морские сельди рода *Clupea* (нельзя путать с сельдями рода *Alosa*, к которому относятся проходные каспийская и черноморская сельди) — не только одни из самых массовых морских рыб, но и важнейшие объекты рыболовства. Разумеется, сельди были и остаются одной из наиболее изучаемых ихтиологических групп. Как раз у сельдей немецкий ихтиолог Фридрих Хайнке в 1898 г. описал внутривидовые расы, предвосхитив наступление эры популяционного мышления в биологии. С тех пор именно популяции (в разных контекстах именуемые также расами и стадами) рассматриваются ихтиологами в качестве единиц управления запасами рыб и их охраны.

В исследования сельди внесли лепту и отечественные ученые. В центре их внимания была самая доступная для столичных ихтиологов беломорская сельдь, чья история изучения богата недоразумениями*.

Начнем с «вины» беломорской сельди в том, что тихоокеанские и атлантические сородичи долгое время неоправданно считались подвидами одного вида. В 1904 г. П.Ю.Шмидт провел пионерное таксономическое сравнение сельдей Атлантического и Тихого океанов. В качестве первой он взял сельдь с Дальнего Востока, а в качестве второй — выборку из Белого моря. Сравнивая тихоокеанскую сельдь с Дальнего Востока с тихоокеанской по происхождению сельдью из Белого моря, Шмидт пришел к закономерному выводу, что они отличаются на уровне подвидов. Его ошибка стала очевидной уже в 1930-х годах. Несмотря на это, до самых 1980-х годов советские ихтиологи, в том числе знаменитые Л.С.Берг и А.Н.Световидов, «по старинке» рассматривали тихоокеанскую и атлантическую сельдей как подвиды, а беломорскую — как представителя последнего подвида [4].

Конечно, оказалось неожиданным, что тихоокеанская сельдь помимо Тихого океана обитает еще в Белом и Печорском морях. Считается, что в Европе она появилась вскоре после конца последнего оледенения (12 тыс. лет назад). Представляется не случайным, что именно тихоокеанская сельдь пришла «в гости» к атлантической, а не наоборот. Эта сельдь более холодолюбива, а идти нужно было северным морским путем —

* Одно из них почти анекдотическое. Образно выражаясь, исследуя эту рыбу, ученые наплодили красных сельдей (англ. red herring). А «красная сельдь» на жаргоне англоговорящих секретных служб означает отвлекающий маневр, дезинформацию.

вдоль побережья Арктики. Так два вида встретились в морях Северной Европы. Современное их распространение приведено на карте (см. с.52). Но мы думаем, что в прошлом оно менялось, вероятно, реагируя на изменения климата. Очевидно, некогда ареал тихоокеанской сельди простирался гораздо дальше на запад. Иначе откуда взялась балсфиордовская сельдь?

Другое заблуждение относительно природы беломорской сельди было связано с интерпретацией ее популяционной структуры. Этим рыбам свойственно образовывать географические и сезонные расы, и беломорская сельдь не исключение. Например, попросив коллег из Кандалакши достать для нашего исследования у рыбаков несколько десятков особей так называемой егорьевской сельди, которая нерестится близко к Юрьеву дню (6 мая), когда Белое море еще покрыто льдом, мы получили от них 2 кг мелких рыбок граммов по 40 каждая. Такой же заказ на выборку ивановской сельди, нерестящейся в тех же местах, но на Ивана Купала (7 июля), принес нам увесистый мешок 200-граммовых гигантов. Егорьев-



Подледный лов егорьевской сельди во время нереста. Губа Чупа, Кандалакшский залив, Белое море, апрель 1983 г.

Фото Д.Л.Лайуса

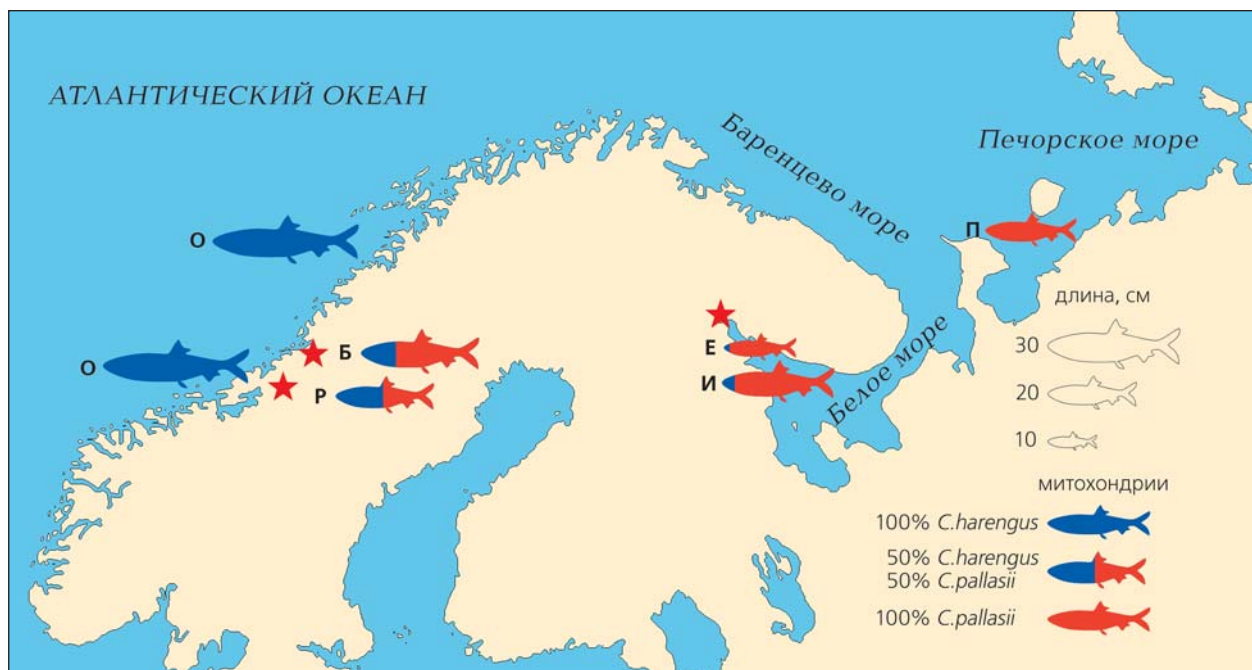
ская и ивановская сельди — лучший пример сезонных рас у сельдей. Помимо сроков нереста и размеров тела, они различаются по многим другим признакам.

В 1960-х годах «советские ученые доказали», что беломорская сельдь представляет собой «единое биологическое целое», т.е. одну популяцию, а выделяемые в ее пределах расы — это или разные онтогенетические стадии (молодые, старые), либо эфемерные группировки, способные превращаться друг в друга за одно поколение. Тезис о свободном взаимопревращении разных популяций друг в друга напоминает знаменитую иллюстрацию о рождении из яйца пеночки птенца кукушки — «закона жизни биологического вида», который был открыт Т.Д.Лысенко. Сходство не случайно: новой концепцией популяционной структуры рыб (вернее, отсутствия этой структуры) ихтиологи отозвались на конъюнктуру времени «мичуринской биологии» [4]. Сегодня трудно понять, как можно было всерьез принимать учение Лысенко. Возможно, наш пример поможет что-то прояснить.

Как сказано, единица промысла и охраны рыб — популяция. Согласно правилам, ученые пишут для рыбаков инструкции, где, когда, сколько и какой рыбы те могут выловить. Инструкции составляются таким образом, чтобы не допустить истощения каждой из популяций. Но разные популяции в разной степени пригодны для промысла. Например, на скалистом дне нельзя использовать самые уловистые для сельди снасти — донные тралы. «Отменив» популяции, ученые позволяют рыбакам ловить сельдь там, где это удобнее всего. В первые годы промысла рыбаки и наука отрапортовывают стахановскими уловами. Потом, скорее всего, наступит кризис, потому что самые доступные популяции окажутся подорванными, а то и истребленными. Опыт рыболовства говорит, что расы сельдей, раз исчезнув, не возрождаются за счет других рас (по крайней мере, на человеческой памяти), — факт, на который еще в 1862 г. указывал пионер исследований беломорской сельди Н.Я.Данилевский. Но кризис рыболовства случится когда-нибудь потом, и его причины можно будет списать на независимые от ученых факторы. В нашем случае, инициатива запоздала: время «мичуринской биологии» подходило к концу, да и сама беломорская сельдь, увы, в 1960-х годах потеряла свое прежнее хозяйственное значение. Но это уже другая история.

Люди и сельди

Вдохновленные достижениями предшественников, мы обратились к беломорской сельди. Во всех выборках из Белого моря Ханна нашла, хотя и в небольших количествах, митохондрии *S.barengus*. В частности, у двух из 50 егорьевских и четырех из 36 ивановских сельдей из канда-



Район исследования сельдей и частота митохондрий двух видов в изученных выборках сельди: ивановской (И), егорьевской (Е), чёско-печорской (П), норвежской океанической (О), из Балсфиорда (Б) и из Россфиорда (Р). Размер пиктограмм пропорционален размеру взрослых рыб, частота митохондрий атлантического вида показана синим цветом, тихоокеанского — красным.

лакшских сборов. По своим аллозимным генотипам эти рыбы ничем не отличались от остальных, с митохондриями *C.pallasii*, т.е. не были ни «заблудшими» в Белое море атлантическими сельдями, ни гибридами ранних поколений между *C.barengus* и *C.pallasii*. В то же время частота «атлантических» аллозимных аллелей у ивановской сельди была повышена на 7–10%, а у егорьевской на 3–5%. А вот у чёско-печорской сельди ни митохондрий *C.barengus*, ни излишка «атлантических» аллелей не было. Эта сельдь ничем не отличалась от *C.pallasii* из Тихого океана.

За «загрязнением» атлантическими аллелями генофондов беломорской сельди должна стоять гибридизация с *C.barengus* и последующая интрогрессия — проникновение генов одного вида в генофонд другого. Это происходит, когда гибрид первого поколения скрещивается с одним из родительских видов, а появившиеся потомки скрещиваются с этим же видом. И так далее. В результате возникают особи с единичными генами другого вида. Рыб от таких возвратных скрещиваний и гибридами уже не назовешь. Как и с сельдью из Балсфиорда, мы не знаем, где и когда происходила гибридизация. Мы думаем, что не случайно именно у ивановской сельди больше атлантических аллелей, чем у егорьевской, потому что она и по размерам тела (крупная), и по условиям нереста (безледный период) больше похожа на атлантическую сельдь. Скорее всего, она-то и передала свои аллели ивановской, а к егорьевской они

попали уже через скрещивание с последней. Кстати, сельдям, у которых спермии долгое время сохраняют живучесть в морской воде, для «внеплановых» оплодотворений не обязательно нереститься вместе, достаточно делать это на нерестилищах, расположенных неподалеку.

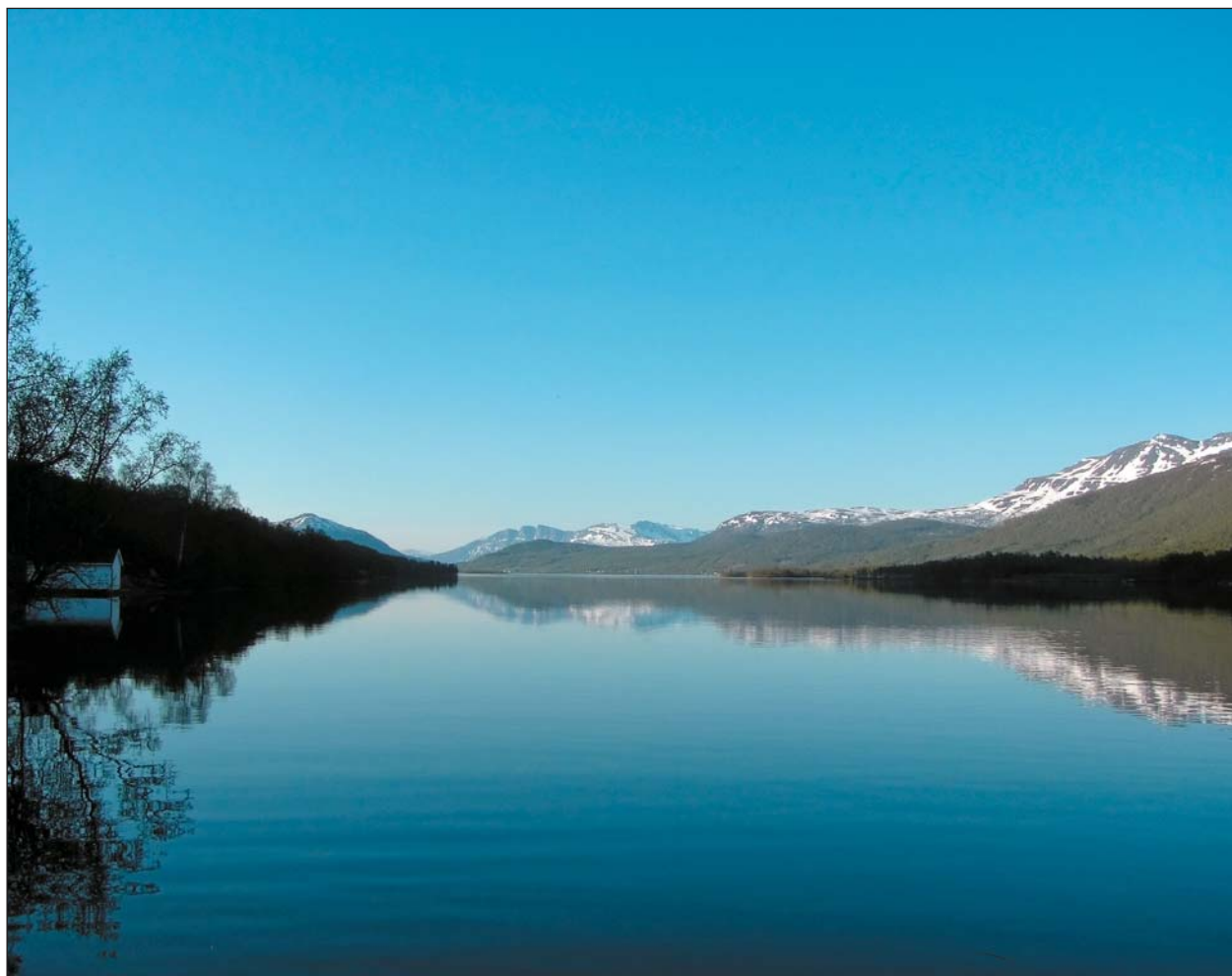
Другой вопрос, который волнует нас больше всего: связаны ли биологические различия между популяциями *C.pallasii* с наличием и количеством чужеродных аллелей? Поясним эту идею на другом, лучше разработанном примере. При заселении Евразии (примерно 50 тыс. лет назад), люди нашего вида (*Homo sapiens*) гибридизовали с другим человеческим видом, неандертальцами [5, 6]. По молекулярно-генетическим данным, гибриды, как и положено межвидовым гибридам, были редкими. И несчастными в личной жизни [7]. Тем не менее интрогрессия состоялась. В результате сегодня все евразийцы несут в своих геномах от 1.5 до 4 % неандертальских генов. Распределены они по геному неслучайно. По некоторым генам их частота непропорционально высока, что косвенно указывает на то, что этим аллелям благоприятствовал естественный отбор. Некоторые из них, действительно, дают своим носителям преимущества, в частности к жизни в холодных климатических условиях. Сапиенсы, как выходцы из жаркой Африки, не имели этих генетических адаптаций и «позаимствовали» их у коренных жителей холодных областей Земли, неандертальцев. Ситуация с рядом других «неандертальских» аллелей,

например, сцепленных с предрасположенностью к курению табака и депрессии, конечно, менее однозначна [5, 6]. Итак, «чужие» аллели не только оказываются маркерами различий между популяциями (у евразийцев неандертальские аллели есть, а у африканцев нет), но и напрямую определяют популяционные фенотипы: как преимущества, так, возможно, и недостатки представителей разных популяций. Мы полагаем, что интрогрессивная гибридизация, несмотря на издержки, связанные с пониженной приспособленностью гибридов, — это источник адаптаций и фактор формирования. Что у людей, что и у сельдей.

Озерная сельдь

В сотне километров к западу от Балсфиорда, среди гор, раскинулось заповедное озеро Россфиорд, сообщающееся с морем короткой рекой. Россфиорд — один из редкого типа водоемов, морских озер (подробнее см. [8]). Поверхност-

ные воды озера пресные, глубинные соленые, причем глубже 15 м отравлены сероводородом. В линзе соленой аэрированной воды ютится сообщество морских организмов, заселившее озеро в стародавние времена, когда уровень воды в океане был выше, и озеро было морским заливом. Среди обитателей этого морского «аквариума» есть и сельдь, резко уклоняющаяся по морфологии и поведению от морских сородичей. По некоторым признакам, например по числу позвонков, она занимает промежуточное положение между *C.barengus* и *C.pallasii*. Может быть, генофонд реликтовой сельди «зафиксировал» давнее проникновение тихоокеанской сельди в глубь ареала атлантической, а то и ранний этап гибридизации между ними? Положа руку на сердце, признаемся, что к исследованию сельди Россфиорда нас подталкивала не только научная логика, но и уязвленное самолюбие. Статьи про гибридизацию у сельдей принимались к печати в научных журналах с большим трудом. Анонимные рецензенты, в которых угадывались эксперты по атланти-



Морское озеро Россфиорд, где добывали рыбу для нашего исследования.

Фото П.П.Стрелкова

ческой сельди, реагировали бурно на наши тексты, и это даже можно понять. Интрогрессия, образно выражаясь, есть палка о двух концах. Если генофонды европейской *C.pallasii* «загрязнены» аллелями *C.barengus*, то, вероятно, справедливо и обратное. «На кону стояла» интерпретация генетической изменчивости атлантической сельди — одной из важнейших промысловых рыб Мирового океана.

Не будем описывать все сложности организации полевого исследования в чужой стране, в глуши, в заповеднике. Мы приехали на берег Россфиорда, когда с него еще не сошел лед. На берегу нас встречал, с лицензией на научный лов в руках, «перевербованный» норвежский ихтиолог Трулс Моум из Университета Нордланда. Не покладая рук мы охотились за реликтовой сельдью. Наши сети принесли всю ихтиофауну озера: форель, трехиглую колюшку, сайду, речную камбалу, треску. И сельдь. Три рыбы, всего три рыбы — безнадежно мало для популяционного исследования! Провал был публичным: из-за занавесок красных домиков с черными крышами мы чувствовали взгляды жителей коммуны Россфиорд, потомственных рыбаков, которым уже полвека закон не разрешал опускать сети в эти заповедные воды.

Прошло полгода, и под Рождество к порогу лаборатории Трулса доставили объемную посылку — пенопластовую коробку вроде тех, в которые норвежские рыбаки пакуют свой улов. В коробке лежали прекрасные серебристые рыбы. Это был подарок от коммуны Россфиорд. Старые рыбаки, помнившие с молодости секреты лова озерной

сельди, закрыли нашу лицензию. У каждой первой рыбы мы нашли митохондрии *C.barengus*, у каждой второй — *C.pallasii*. По аллозимам сельдь из Россфиорда оказалось похожей на сельдь из Балсфиорда.

Какие все-таки странные сельди живут в северной Норвегии. Вроде уже и не тихоокеанские. Но еще далеко не атлантические. То ли «два в одном», то ли уже что-то третье, новые гибридные таксоны. Пример сельди из Балсфиорда показывает, что гибридная сельдь может обитать в тех же водах, что и атлантическая, и нереститься поблизости (на другой глубине), сохраняя при этом свою идентичность. Пример сельди из Россфиорда, заточенной в морском озере, показывает, что атлантическая и гибридные сельди сосуществуют в этих водах многие поколения. Было бы интересно «познакомить» гибридную сельдь со вторым родителем, *C.pallasii*. Посмотреть, воспримут ли они друг друга как брачных партнеров. К сожалению, природа для нас такой эксперимент не поставила. И остается вопрос об атлантической сельди. Если гены другого вида, пусть в малых количествах, сохраняются в генофондах людей Евразии и через 50 тыс. лет после ограниченного контакта с неандертальцами, разве мы не вправе ожидать того же у океанической норвежской сельди, факт интрогрессивной гибридизации которой с *C.pallasii* в северной Норвегии и в Белом море доказан? Нет, не мог этот тихоокеанский вид не «наследить» в генофондах популяций атлантического. А значит, погоню за гибридной сельдью надо продолжить. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-04-00723 а) и Санкт-Петербургского государственного университета (проект 1.38.253.2014).

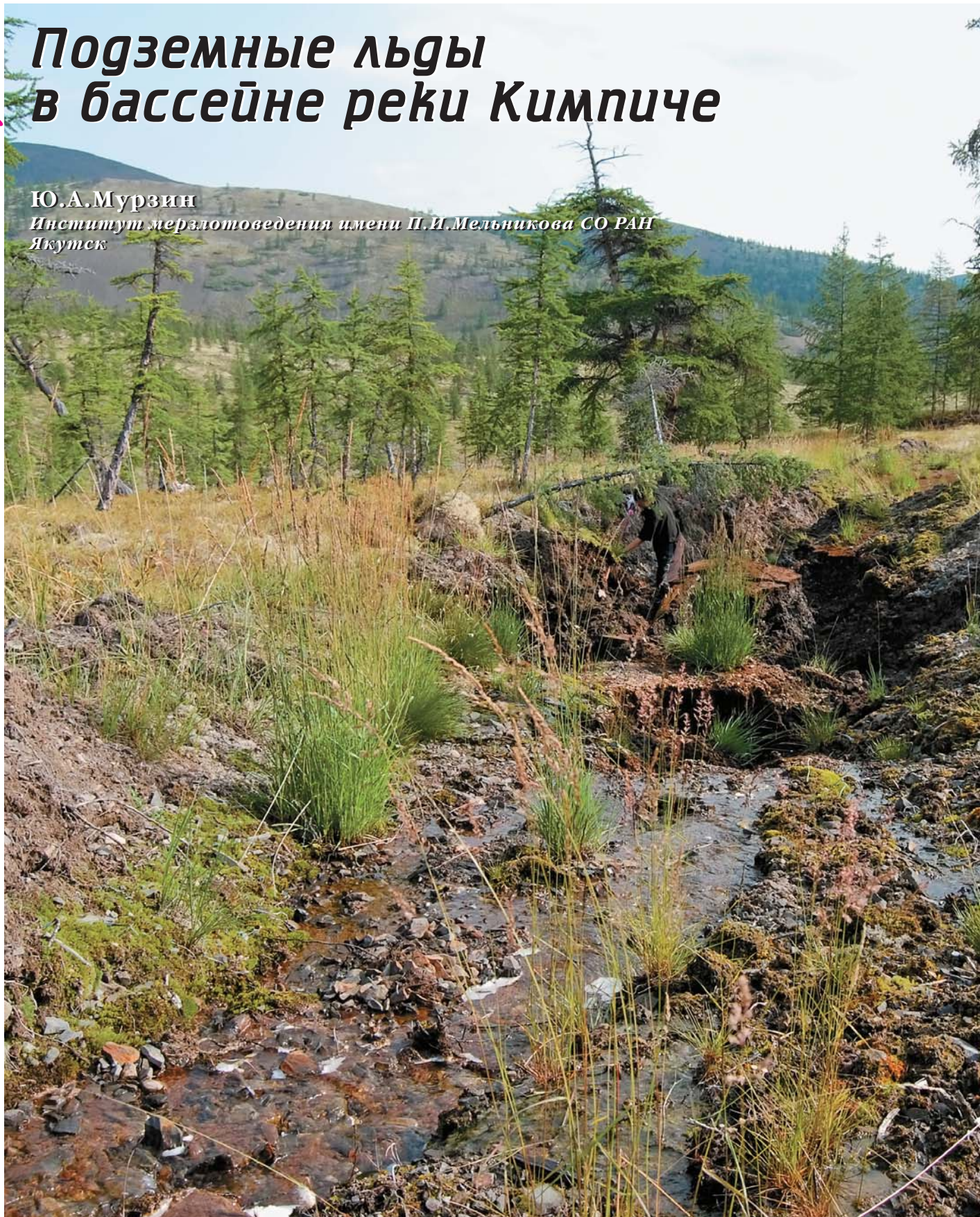
Литература

1. Jørstad K.E., Dable G., Paulsen O.I. Genetic comparison between Pacific herring *Clupea pallasii* and a Norwegian fjord stock of Atlantic herring *Clupea harengus* // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1994. V.51. P.233–239. Doi:10.1139/f94-309.
2. Laakkonen H.M., Strelkov P., Lajus D.L., Väinölä R. Introgressive hybridization between the Atlantic and Pacific herrings (*Clupea harengus* and *C.pallasii*) in the north of Europe // Mar. Biol. 2015. V.162. P.39–54. Doi:10.1007/s00227-014-2564-x.
3. Laakkonen H.M., Strelkov P., Lajus D.L., Väinölä R. Phylogeography of amphiboreal fish: tracing the history of the Pacific herring *Clupea pallasii* in North-East European seas // BMC Evol. Boil. 2013. V.13. P.1–16. Doi:10.1186/1471-2148-13-67.
4. Lajus D.L. Long-term discussion on the stocks of the White Sea herring: historical perspective and present state // ICES Marine Science Symposia. 2002. V.215. P.315–322.
5. Sankararaman S., Mallick S., Dannemann M. et al. The genomic landscape of Neanderthal ancestry in present-day humans // Nature. 2014. V.507. P.354–357. Doi:10.1038/nature12961.
6. Simonti C.N., Vernot B., Bastarache L. et al. The phenotypic legacy of admixture between modern humans and Neandertals // Science. 2016. V.351. P.737–741. Doi: 10.1126/science.aad2149.
7. Mendez F., Poznik D., Castellano S., Bustamante C. The Divergence of Neanderthal and Modern Human Y Chromosomes // The American Journal of Human Genetics. 2016. V.98. P.728–734. Doi:10.1016/j.ajhg.2016.02.023.
8. Стрелков П.П. Мир морских озер // Природа. 2015. №8. С.12–20.

Подземные льды в бассейне реки Кимпиче

Ю.А.Мурзин

*Институт мерзлотоведения имени П.И.Мельникова СО РАН
Якутск*





Термоэрозионный овраг на вездеходной дороге в долине ручья Граничный.

Здесь и далее фото автора

Несколько лет назад в Якутии, в долине р.Кимпиче (притока р.Бытантай) открыто перспективное месторождение серебра. С тех пор каждый год здесь работают геологи самых разных специальностей. Одно из направлений таких работ связано с изучением слоя многолетней мерзлоты в долине Кимпиче и ее притоков — ручьев Глубокий, Широтный и Берелёх. Между Институтом мерзлотоведения имени П.И.Мельникова СО РАН и ОАО «Янгеология» заключен договор на выполнение работ по теме «Мерзлотно-геотермические исследования на участке Кимпиче». Перед нами поставлены следующие задачи: провести мерзлотно-геотермические измерения в скважинах на участке Кимпиче; дать оценку геокриологических условий территории; построить геотермический разрез по линии скважин (тех, где будут проведены геотермические измерения).

Для решения этих задач в июле—августе 2011 г. в бассейне Кимпиче были организованы полевые исследования. Мы отправились туда вдвоем с ведущим инженером лаборатории геотермии криолитозоны И.Е.Мисайловым.

За период полевых работ удалось обследовать несколько обнажений и криогенный рельеф территории. Полученные результаты прошли камеральную обработку и теперь могут быть представлены вниманию читателей.

Месторождение Кимпиче располагается в одном из самых труднодоступных районов Якутии — Эвено-Бытантайском улусе. В орографическом отношении территория представляет собой пологие юго-восточные склоны Верхоянского хребта с абсолютными отметками 800–1300 м. Это сильно расчлененное среднегорье с выложенными водоразделами, крутыми склонами и корытообразными долинами ручьев.

Исследуемая территория находится в пределах Верхояно-Чукотской мезозойской складчатой области. В геологическом строении принимают участие осадочные породы мезозоя и рыхлые четвертичные отложения. Мезозойские терригенные породы представлены толщей переслаивающихся алевролитов, песчаников и аргиллитов триасового и юрского возраста. Рыхлые отложения перекрывают большую часть территории, их мощность в отдельных случаях значительно превышает 10 м.

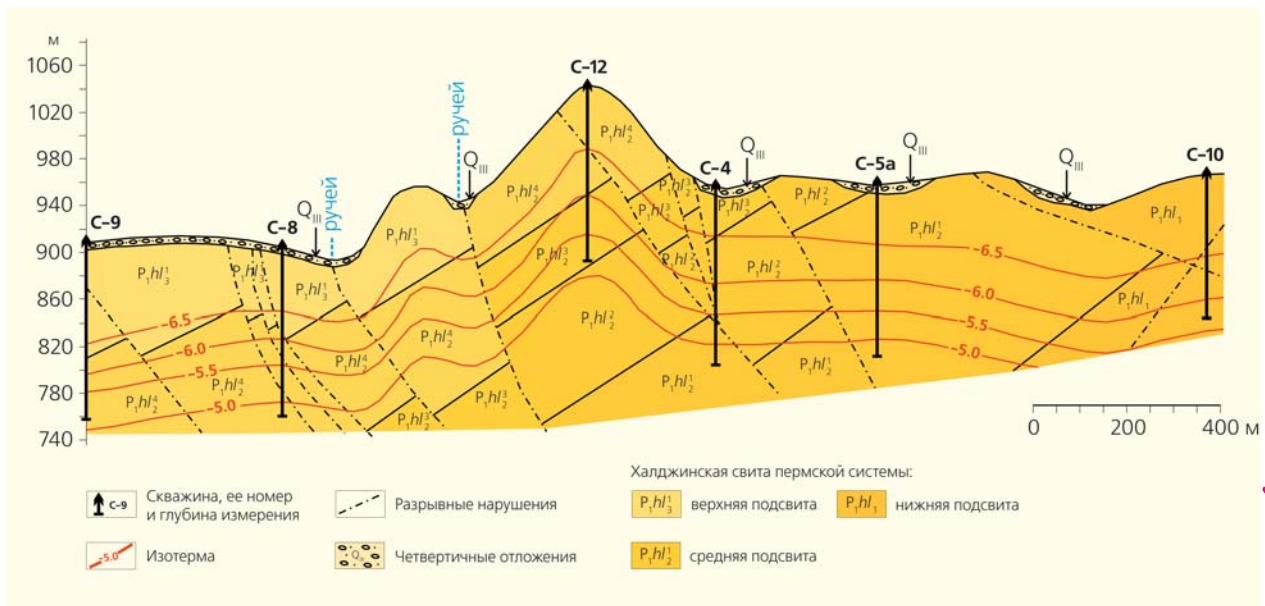
Климат здесь резко континентальный, с низкими зимними и относительно высокими летними температурами воздуха и малым количеством осадков. Их годовая сумма — 180–200 мм, летом выпадает 85–134 мм. Среднегодовая температура воздуха составляет -15.9°C . Наиболее холодный месяц — январь со средней температурой -45.1°C , а самый теплый — июнь, когда воздух прогревается до 9.9°C [1].



Юго-восточный склон Верхоянского хребта.



Долина ручья Широтный.

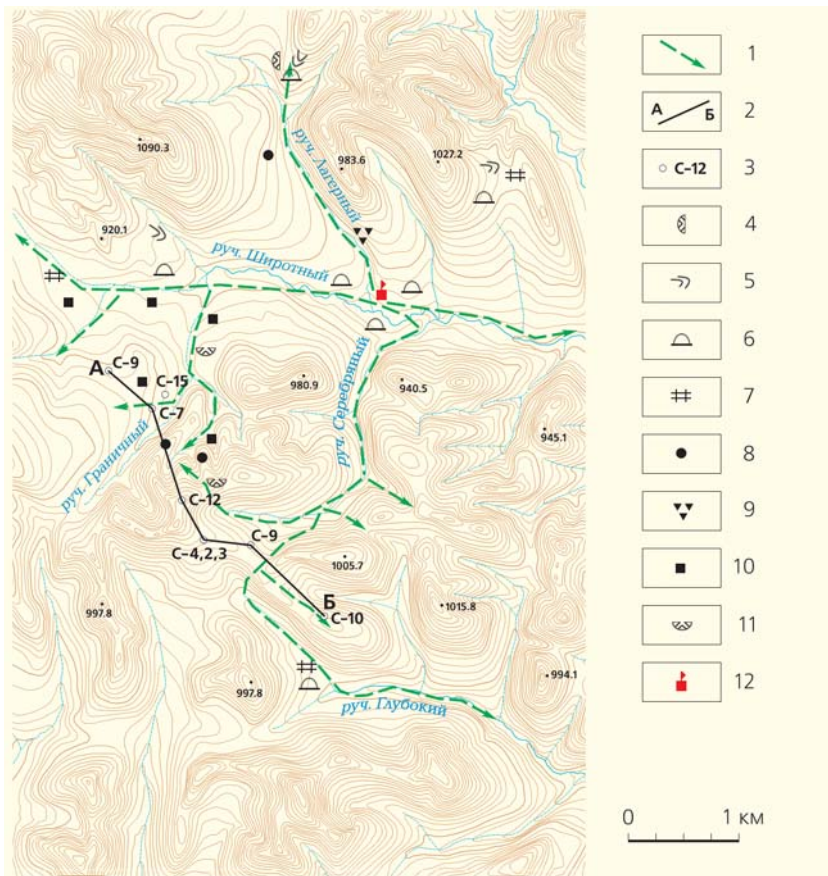


Геолого-геотермический разрез по линии скважин.

На участке Кимпиче основными водотоками считаются ручьи второго и третьего порядка. Все они имеют быстрое течение и непостоянный водный режим, который зависит от количества атмосферных осадков. Ручьи становятся многоводными в период весеннего половодья (конец мая — начало июня). Дождевые паводки периодически случаются на протяжении всего теплого периода. В сентябре ручьи сильно мелеют, иногда пересыхают полностью, а к началу зимнего периода часто промерзают до дна. В отдельных местах при замерзании омутов формируются небольшие бугры пучения.

Почвенный покров в окрестностях долины Кимпиче неоднороден. На плоских водораздельных вершинах обычно встречаются мерзлотные горно-тундровые почвы, а также тундровые подбуры и курумники. Ниже по склону почвы меняются на мерзлотные северотаежные или мерзлотные таежные. В долинах рек и ручьев распространены комплексы почв пойменных и надпойменных террас [2, 3].

В растительном покрове тесно переплетены широтная зональность и вертикальная пояс-



Участок Кимпиче: 1 — пешие маршруты; 2 — линия геотермического профиля; 3 — скважины, где были проведены замеры температуры горных пород; 4 — горные террасы; 5 — солифлюкция; 6 — пятна-медальоны; 7 — морозобойные полигоны; 8 — термокарст; 9 — осыпи щебнистого материала; 10 — подземные льды; 11 — обнажения; 12 — база геологов.



Уступ нагорной террасы.

ность. Для наиболее возвышенных частей Верхоянского хребта характерны кустарниково-лишайниковые и моховые тундры, ниже лежат лесотундровые лиственничные лишайниковые редколесья. В долинах ручьев распространена пойменная растительность — луга в сочетании с лесами, кустарниками и болотами.

Суровые климатические условия региона привели к развитию здесь сплошной толщи многолетнемерзлых пород [4, 5]. Измерения, выполненные в скважинах, показали, что температура горных пород на подошве слоя годовых колебаний изменяется от -6.2°C до -6.9°C , геотермический градиент равен $2.3^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, а мощность мерзлой толщи составляет 330–350 м. На геолого-геотермическом профиле видно, что изотермы плавно повторяют контуры дневной поверхности. Можно предположить, что под отдельными гольцовыми вершинами с отметками, превышающими 1000 м, мощность многолетнемерзлых пород может достигать 400–450 м.

В Верхоянье и непосредственно на участке Кимпиче распространены несколько видов подземных льдов и криогенного рельефа. Это многообразие — результат отрицательных среднегодовых температур, сложного геологического строения региона и сплошного развития мерзлоты. Здесь можно встретить нагорные (или гольцовые) террасы, пятна-медальоны, термокарстовые просадки, морозобойные трещины, мерзлотные полигоны. Нередко наблюдается явление солифлюкции.

Нагорные террасы — площадки, образованные морозным выветриванием и солифлюкцией, — чаще всего встречаются в гольцовой зоне водоразделов на склонах средней крутизны в их предвершинной части. Максимальные высотные отметки водоразделов, на которых присутствуют террасы, — чуть более 1000 м. Площадки нагорных террас образуются на отметках 900–950 м. Высота их уступов достигает 10 м, протяженность — нескольких сотен метров, а крутизна бортов не превышает 45° .

На плоских террасах формируются многочисленные солифлюкционные потоки, состоящие из щебнисто-супесчано-суглинистого материала. Их образование вызвано движением перувлажненного тонкодисперсного грунта вниз с площадки нагорной террасы. Протяженность солифлюкционных потоков составляет 5–10 м, ширина — 1–3 м, высота фронтального уступа — до 1 м. Кроме солифлюкционных потоков на террасах присутствуют пятна-медальоны, образование которых связано с пучением и морозной сортировкой супесчано-щебнистого материала. Чаще всего пятна-медальоны имеют округлую форму, их высота не превышает 0.5 м при диаметре от 1 до 1.5 м.

Во многих местах на склонах средней крутизны отмечается повсеместное движение щебнистого материала. Чаще всего оно приурочено к ложбинам, где после выпадения осадков идет интенсивный сток воды. По самим ложбинам выносятся и супесчаный материал. Накапливаясь



Термокарстовые просадки и пятна-медальоны на площадках нагорных террас.



Движение щебнистого материала на склонах средней крутизны.



Конус выноса в нижней части склона.



Подземный лед полигенетического происхождения в стенке обрыва термоэрозионного оврага.

в нижней части склона, он формирует конусы выносов, которые, сливаясь между собой, образуют мощный чехол наносов с высоким содержанием подземного льда.

Приведу описание обнажения в термоэрозионном овраге, который находится в правом борту долины ручья Граничный. Здесь в нижней части пологого склона северо-западной экспозиции проходит вездеходная дорога. В ее колее и начал формироваться овраг. Его протяженность уже превысила 100 м. Высота стенок бортов в отдельных местах достигает 3 м. При зачистке обнажения был вскрыт лед, который появляется с глубины 1 м и прослеживается на всем протяжении оврага, плавно повторяя контуры дневной поверхности. Видимая мощность льда — более 1 м, а по косвенным признакам ясно, что его полная мощность может достигать 4–5 м. Лед мутный, со множеством пузырьков воздуха, изредка встречаются грунтовые прослойки. Предположительно, этот лед имеет полигенетическое происхождение (инъекционный, сегрегационный повторно-жильный и др.) и протягивается широкой полосой вдоль подножия пологих склонов.

Несмотря на широкое распространение подземного льда, залегающего близко к дневной поверхности, термокарст развит здесь лишь ограни-

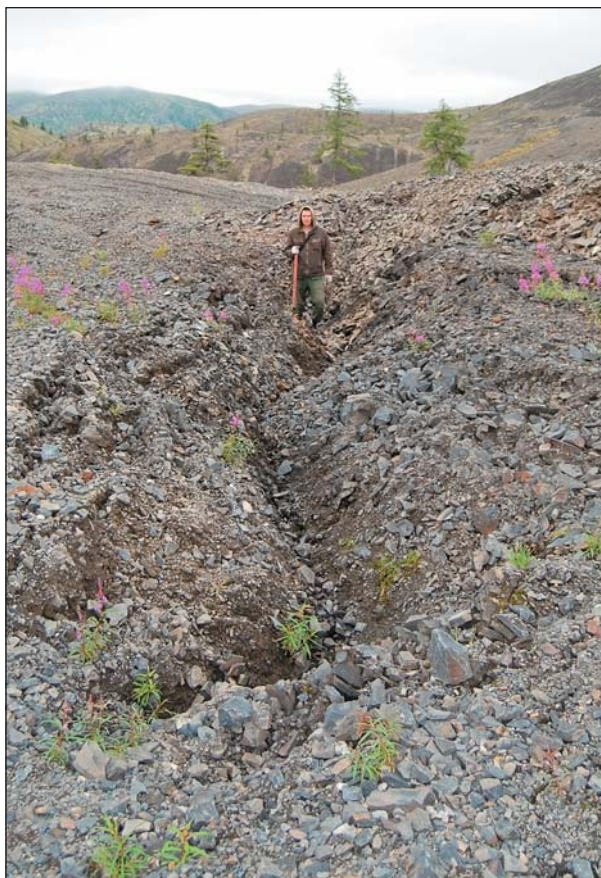
ченно. Это, вероятно, обусловлено низкими температурами горных пород и большими запасами холода в них. Данная территория относится к области с высокой термической устойчивостью [6].

Зарождение термокарста в виде отдельных воронок и канав мы наблюдали на площадках, расчищенных бульдозером для проведения буровых работ (в таких расчистках снимается верхний слой рыхлых отложений и часто обнажаются коренные породы). Так, при обследовании одной из площадок были отмечены протяженные (более 10 м), зигзагообразные термокарстовые просадки по трещинам в коренных породах. Ширина трещин достигает 0,3 м, а глубина — более 2 м. Чаще всего эти трещины засыпаны щебнем, и на поверхности прослеживаются только глубокие канавы. Всего на месторождении было обследовано более 10 таких площадок, и практически на всех имеются термокарстовые просадки. Объясняется это тем, что коренные породы на участке Кимпиче представлены в основном алевролитами — сильно трещиноватыми и заполненными льдом.

На одном из маршрутов, в верховьях ручья Лагерный, на восточном склоне, в ложбине стока, между горизонталями 880 и 870 м была обследована термокарстовая воронка диаметром около 20 м. В ее центральной части на поверхности коренных пород хорошо выражена протяженная тектоническая трещина. Вода, стекающая в центральную (наиболее низкую) часть воронки, с шумом уходит в эту трещину и затем в виде трех источников выходит на поверхность в долине ручья (абсолютная отметка 865 м). Таким образом, в пределах участка Кимпиче на развитие термокарста влияет и тектоническая деятельность, хотя это и не так ярко выражено, как, скажем, в долине р.Кючюс* [7].

Таким образом, исследования в бассейне р.Кимпиче позволили установить, что здесь из-за

* См.: Мурзин Ю.А. Вечная мерзлота в долине реки Кючюс // Природа. 2014. №2. С.39–44.



Трещина в коренных породах.

крайне суровых климатических условий развита сплошная толща мерзлых пород. В предвершинных частях водоразделов присутствуют различные мерзлотные формы (нагорные террасы, солифлюкционные потоки, пятна-медальоны и др.), а у подножий пологих склонов залегает полигенетическая толща подземного льда мощностью более 5 м. Наличие же термокарстовых форм обусловлено тектоническими дислокациями, а также антропогенным воздействием. ■

Литература

1. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып.24: Якутская АССР. Кн.1. Л., 1989.
2. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М., 1989.
3. Атлас Якутской АССР. М., 1989.
4. Мурзин Ю.А., Мисайлов И.Е., Железняк М.Н. Геокриологические условия в бассейне ручья Кимпиче (приток р.Бытантай) // Вопросы географии Якутии. Вып.11: Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны. Якутск, 2013. С.133–139.
5. Мурзин Ю.А., Жижин В.И. Геокриологические условия месторождения Кимпиче // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 1–2 апреля 2014 г. Якутск, 2014. С.298–303.
6. Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // Криосфера Земли. 2011. Т.ХV. №4. С.33–36.
7. Мурзин Ю.А., Жижин В.И. Геокриологические условия месторождения Кючюс // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2–4 апреля 2013 г. Якутск, 2013. Т.П. С.29–32.

АВТОР «КУРСА ФИЗИКИ» ДЛЯ НОБЕЛЕВСКИХ ЛАУРЕАТОВ

Орест Данилович Хвольсон (1852–1934) – российский физик, ученый и педагог, член-корреспондент Императорской Санкт-Петербургской академии наук, почетный член Российской академии наук и АН СССР. Внес вклад в физику исследованиями магнетизма, теплопроводности и диффузии света; наиболее известны его работы по актинометрии (изучению процессов передачи и превращения излучения Солнца на Земле, а также излучения Землей своей энергии); созданные им конструкции актинометра и пиргелиометра долгое время применялись в нашей стране. Важнейшее же его достижение – создание пятитомного учебника «Курс физики», который в значительной мере способствовал поднятию уровня преподавания данной науки и долгое время оставался основным пособием в советских вузах. Именно с этого учебника начиналось знакомство с наукой всех отечественных лауреатов Нобелевской премии по физике. Данному труду ученого посвящена статья П.Буссемера и В.В.Ржевского «К истории создания учебника физики О.Д.Хвольсона».

Орест Данилович не остался равнодушен к попыткам подменять реальное знание умозрительными воззрениями, упрощенными построениями и верхоглядством, что так характерно для переломных эпох, когда прирост знаний опережает способность их осмыслить. В 1906 г. он издал в Германии небольшую книгу*, которая в 1908 г. была переиздана (русское дополненное издание** вышло в 1911 г.). В ней были аргументировано, ярко и исключительно остроумно раскритикованы естественнонаучные взгляды «властителей дум» XIX в.: Г.В.Фегеля (творца немецкой классической философии), Э.Г.Ф.А.Геккеля (немецкого естествоиспытателя и философа, пропагандиста эволюци-



Портрет О.Д.Хвольсона работы И.Б.Стреблова (1928) и обложка 1-й части IV тома («Учение о магнитных и электрических явлениях») первого издания «Курса физики» Хвольсона (1907).

онных идей и дарвинизма, апологета «монизма» – научно-философской теории, призванной заменить религию) и Г.Коссута (ныне забытого последователя Геккеля, пропагандировавшего его мировоззрение в статье «Несколько заметок по поводу “Мировых загадок” Геккеля», опубликованной в немецком научном издании «Журнал философии и философской критики»). Увы, этот труд Ореста Даниловича был практически недоступен для отечественного читателя в советское время. Причина в том, что В.И.Ульянов (Ленин) в книге «Материализм и эмпириокритицизм» (глава VI, раздел 5: «Эрнст Геккель и Эрнст Мах») так отозвался о нем: «Русский физик, г.Хвольсон, отправился в Германию, чтобы издать там подлую черносотенную брошюрку против Геккеля и заверить почтеннейших господ филистеров в том, что не все естествознание стоит теперь на точке зрения “наивного реализма”». Журнал «Природа» предлагает читателям познакомиться с некоторыми разделами этой книги и самим оценить ее достоинства.

* Hegel, Haeckel, Kossuth, und das zwölfte Gebot; eine kritische Studie von O.D.Chwolson. Braunschweig: FVieweg und Sohn, 1906.

** Хвольсон О.Д. Гегель, Геккель, Кошут и двенадцатая заповедь. Критический этюд. СПб.: Книгоиздательство PHYSICE, 1911.

К истории учебника физики О.Д.Хвольсона

П.Буссемер (P.Bussemer),

доктор физико-математических наук

Кооперативный государственный университет Гера—Айзенах
г.Гера (Германия)

В.В.Ржевский,

кандидат физико-математических наук

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

История культурного общения России и Германии насчитывает более 1000 лет. Российско-германские отношения в области науки развились в первую половину XVIII в. — в эпоху реформ Петра I по модернизации страны. В лице Г.В.Лейбница, выдающегося немецкого философа и математика, Петр I нашел близкого по духу достойного партнера и друга, с которым он несколько раз встречался во время своих визитов в Германию. Незадолго до кончины (в нынешнем году исполняется 300 лет со дня его смерти) Лейбниц по просьбе царя написал меморандум* о совершенствовании искусств и наук в Российской империи [1, S.196], в котором предлагал создать университеты в Москве, Киеве и Астрахани.

Идеи Лейбница выходили далеко за национальные пределы, в них уже содержались элементы панъевропейского и международного сотрудничества, они были приняты во внимание в 1724 г. при создании Санкт-Петербургской академии наук. Россия пригласила видных ученых из Германии, Швейцарии, Франции и создала благоприятные условия для их работы в академии, что послужило на благо не только наукам (математическим, естественным и гуманитарным), но и самой России: за относительно короткий срок она вошла в число ведущих научных центров Европы. Этому немало способствовало то обстоятельство, что по императорскому указу Академия наук стала не только научным, но и учебно-образовательным учреждением, чем отличалась от европейских. При ней существовали университет и гимназия, в которых преподавали профессора-академики. До 1733 г., в пер-

вом составе, 20 членов Академии были родом из германских государств, пять — из Швейцарии, два — из Франции и только один — из России [3, с.1351]. Академики способствовали дальнейшему привлечению ученых в Россию. Так было, например, со швейцарским математиком Л.Эйлером, который более чем 30 лет (1727–1741 и 1766–1783) проработал в Петербурге. Наоборот, из России в Германию на средства Санкт-Петербургской академии наук направлялись российские студенты. Так, М.В.Ломоносов в 1736–1741 гг. учился в Марбургском университете под научным руководством юриста, математика и физика Х.Вольфа, одного из самых крупных философов эпохи Просвещения, в 1739–1740 гг. он также изучал горное дело и металлургию под началом металлурга и химика И.Ф.Хенкеля в г.Фрайберге. Позже, уже по возвращению в Россию, Ломоносов, в развитие идей Лейбница и Петра I, разработал проект создания Высшей школы. В 1755 г. первый в России университет как отдельное, независимое высшее учебное заведение был основан в Москве. Усилиями Михаила Васильевича в Санкт-Петербурге в 1746 г. был опубликован первый учебник физики на русском языке. Это был перевод с латинского языка «Экспериментальной физики» Х.Вольфа**, выполненный самим Ломоносовым. К сожалению, за рубежом научные работы Михаила Васильевича по физике и химии были известны мало***. Но в России его работы оценены по до-

** Russen und Deutsche. 1000 Jahre Kunst, Geschichte und Kultur. Katalog der Ausstellungen Moskau/Berlin 2012/13. Petersburg, 2012. S.236.

*** Академик П.Л.Капица в докладе, посвященном 250-летию со дня рождения Ломоносова, приводит яркий пример ограниченности знания его трудов европейскими учеными: *Французский историк химии F.Hoefer (1860 г.) пишет [о Ломоносове] только несколько строк, не лишенных курьеза... «Среди русских химиков, которые стали известными химиками, мы упомянем Михаила Ломоносова, которого не надо смешивать с поэтом того же имени»* [4, с.157].

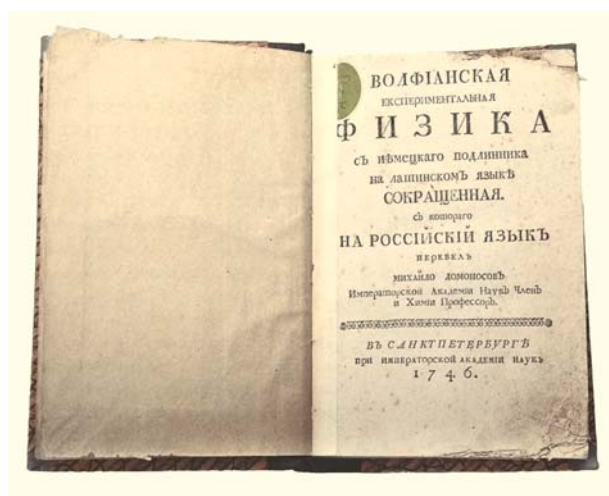
* Название меморандума не сохранилось. Пространная записка указанного содержания, начинавшаяся словами «Nachdem S. Gr. Cz. M. mir allgn. aufgetragen...» (По поручению, милостиво возложенному на меня Его царским величеством...), согласно В.И.Герье [2, с.753], была подана царю в Бад-Пирмонте, близ Ганновера, в июне 1716 г.



Учебник физики профессора Х.Вольфа. По такому учебнику учился М.В.Ломоносов (Russen und Deutsche. 1000 Jahre Kunst, Geschichte und Kultur. Katalog der Ausstellungen Moskau/Berlin 2012/13. Petersberg, 2012. S.241).

стоинству, в 1745 г. М.В.Ломоносов стал первым русским ученым, избранным в Петербургскую академию наук.

Преданное служению науке ценилось и в России, и в Германии. Это находило выражение даже в поэтической форме. Выдающийся русский физик-экспериментатор П.Н.Лебедев в студенческие годы учился в Германии в Физическом институте при Страсбургском университете, а затем в Берлинском университете у профессора А.Кундта, иностранного члена-корреспондента Санкт-Петербургской академии наук, основателя научной школы физиков-экспериментаторов, которая да-



«Экспериментальная физика» Х.Вольфа, переведенная с латыни Ломоносовым, — первый учебник физики в России (Russen und Deutsche. 1000 Jahre Kunst, Geschichte und Kultur. Katalog der Ausstellungen Moskau/Berlin 2012/13. Petersberg, 2012. S.242).

ла таких исследователей, как В.Рентген, В.Гальвакс и др. Примечательно следующее свидетельство П.П.Лазарева, автора биографического очерка о П.Н.Лебедеве: «Кундт очень высоко ставил своего талантливого ученика. Как много в это время Лебедев работал и какое огромное количество тем рождалось в его голове, видно из одного стихотворения, написанного Кундтом в 1889 году. Начало этого стихотворения таково:

*Ideen hat Herr Lebedew
Per Tag wohl zwanzig Stück,
Und für des Institutes Chef
Ist's wahrlich noch ein Glück,
Dass er die Hälfte schon verliert
Eh'er sie überhaupt probirt.*

(У Лебедева каждый день появляется по двадцать новых идей, и для директора института поистине является счастьем, что он половину этих идей растеряет, прежде чем он попробует их осуществить)*.

Российскими и немецкими исследователями совместно были изучены просторы Сибири. Например, в 1829–1830 гг. А.фон Гумбольдт в течение восьми месяцев на средства Российской империи осуществлял научную экспедицию на Урале и в горах Алтая. Его брат Вильгельм реформировал систему образования в Пруссии в духе гуманизма и основал в 1810 г. Берлинский университет, обучение в котором прошли многие российские студенты. Воспитательный идеал В.Гумбольдта с центральной идеей единства исследований и преподавания долгое время определял немецкую историю университетов, его разделяли такие ученые, как Г.Гегель, К.Маркс и А.Эйнштейн. Он включал два фундаментальных, по мнению В.Гумбольдта, понятия образования: автономию личности и открытость научных сообществ разных стран, что было решающим лейтмотивом для прогрессивных деятелей образования в России XIX в.

Одним из них был Орест Данилович Хвольсон (1852–1934), российский физик, член-корреспондент Императорской Санкт-Петербургской академии наук (с 1895 г.), почетный член Российской академии наук (1920–1925) и АН СССР (с 1925 г.), почетный член Берлинского физического общества (с 1922 г.). Его многотомный «Курс физики» в течение более чем 30 лет был одним из ведущих учебников физики не только в России и Советском Союзе, но также и в Германии (даже во время Первой мировой войны). Каким это было вкладом в европейскую научную историю, какие обстоятельства способствовали уникальной судьбе учебника Хвольсона, эти вопросы рассматриваются ниже. Для оценки достоинств учебника физики Хвольсона по существу рекомендуем читателям обратиться к книге В.П.Русакова [5].

* Лазарев П.П. Петр Николаевич Лебедев (Биографический очерк) // Лебедев П.Н. Избранные сочинения. М.; Л., 1949. С.15.

Годы становления

Из автобиографии Хвольсона [6, с.31] следует, что с молодых лет он соприкасался с немецкой культурой и испытывал ее влияние. Вначале через своего отца, Д.А.Хвольсона, известного востоковеда-семиолога, который учился в университетах Бреслау и Лейпцига, знал немецкий язык. Затем через учебу в немецкой гимназии К.И.Мая и даже через посещение концертов в легендарном Павловском вокзале под Санкт-Петербургом. Вот любопытное свидетельство самого Ореста Даниловича на этот счет: *...мне было примерно 15 лет. Я вечером находился в саду Павловского вокзала, около оркестра, и смотрел на знаменитого дирижера; играли симфонию, сад был переполнен. С напряженным вниманием все следили за потоком звуков, которые как бы творились дирижером. Вдруг мне пришла мысль в голову: «А что, если бы и ты смог когданибудь так стоять перед толпой, приковывать к себе внимание, заставить ее слушать твою речь»... Теперь я понимаю, что в этот момент как бы вырвалось наружу дремавшее в моей душе призвание быть дидактом моей науки, призвание — учить [6, с.33].* Сегодня мы можем назвать дирижера, который так впечатлил молодого Хвольсона: в 1866–1869 гг. дирижером был Г.Фюрстенау из Гамбурга*, и в программе прибывшего с ним оркестра доминировала серьезная музыка, симфонические произведения, его концерты проходили с неизменным успехом.

С 1861 г. Орест Хвольсон учился в частной немецкой школе Мая в Санкт-Петербурге. Ее основатель, К.И.Май, выпускник историко-филологического факультета Императорского Санкт-Петербургского университета, был талантливым воспитателем и организатором, он реализовал в школьной практике прогрессивные идеи видных педагогов, в том числе российских и немецких (Н.И.Пирогова, К.Д.Ушинского, И.Г.Песталоцци и Ф.В.Фрëбеля). Школа Мая имела официальный статус «реального училища на степени гимназии» с усиленным преподаванием в области естественных наук и славя-

лась творческой атмосферой. Символом школы было изображение майского жука («майскими жуками» называли и выпускников гимназии). Изречение Я.А.Коменского «Primum amare, deinde docere» («Сперва любить, потом учить») было девизом преподавателей. Гимназия была весьма успешна, в разное время из нее вышли многие ученые и деятели культуры: более 90 докторов наук, 26 членов академии (в их числе был физик-теоретик, член-корреспондент АН СССР Я.И.Френкель).

После окончания гимназии в 1869 г. Хвольсон учился на факультете математики и естественных наук Санкт-Петербургского университета, а с 1873 по 1875 г. продолжил учебу в Лейпцигском университете*. Тот относительно короткий период стал формирующим для его научной карьеры. Промышленная революция в Саксонии уже к 1830 г. привела к превращению этого университета в один из лучших в Германии. Он привлекал выдающихся и талантливых ученых, а во время учебы в нем Хвольсона был ведущим не только среди немецких, но и среди европейских научных центров. Преподавателями Хвольсона в Лейпциге были видные профессора, из которых хочется отметить нескольких.

* При Александре II в 1863 г. было введено новое законодательство для вузов, восстановившее научные контакты с Западом, которые были запрещены Николаем I под влиянием революционных событий 1848 г. В архивах Лейпцигского университета есть запись о Хвольсоне: «Дата регистрации: 10/24/1873. Религия: Греко-католическая. Адрес: Кёнигштрассе 7, двор, 2-й этаж». Дом, в котором жил Хвольсон, не сохранился, он был уничтожен бомбардировкой во время Второй мировой войны.



Празднование 25-й годовщины железной дороги на Царское Село. Концертный зал Павловского вокзала. Картина А.И.Шарлеманя, 1862.

* *...И вот снова пришлось искать дирижера за границей. На этот раз выбор пал на Генриха Фюрстенау из Гамбурга, о котором администрация дороги предварительно собрала справки за границей. Фюрстенау был приглашен в 1866 г. с платой в 24 тысячи и обязался привести полный оркестр из 50 музыкантов (Финдейзен Н.Ф. Павловский музыкальный вокзал. Исторический очерк (1838–1912). СПб., 2005. С.108).*



Библиотека в Петербургской школе К.Мая (Архив музея Санкт-Петербургской школы К.И.Мая, www.kmay.ru).

Математик К.Г.Нейман в течение 42 лет был «путеводной звездой» математической физики в Лейпциге. Он разработал специальные методы для точного решения основных задач гидродинамики и электростатики путем выбора подходящих систем координат и разложения в ряд конкретных систем функций. Хвольсон слушал его лекции по математической физике и в последующем настаивал на необходимости введения этого предмета в программу физического отделения Санкт-Петербургского университета и полезности семинара по математической физике для студентов. Методы Неймана остаются актуальными вплоть до наших дней: один из авторов настоящей заметки, П.Буссермер, использовал подход Неймана для решения простым способом задачи о заряде на диэлектрической сфере [7].

Астрофизик И.К.Цёлльнер заложил основы современной астрофотометрии. На его лекциях Хвольсон познакомился с проблемами измерения интенсивности солнечного излучения. Позже Орест Данилович построит теорию абсолютных измерений солнечной радиации с помощью пиргелиометра и относительных с помощью актинометра, а также предложит конструкцию этих приборов, применявшихся в Павловской обсерватории более 10 лет. Следует сказать, что именно в области астрономии Хвольсон получил свой наиболее значительный научный результат (речь идет о работе, посвященной гравитационным линзам 1924 г.), который цитируют до сих пор [8].

Физик Г.Г.Видеманн заведовал первой в мире кафедрой физической химии. Его четырехтомная монография по электромагнетизму стала стандартным учебником, выдержавшим несколько переизданий [9]. Работы Хвольсона по изучению магнетизма образцов сферической формы и по эфирной теории электричества проводились под

его научным руководством. Возможно, эти исследования привели Ореста Даниловича к неправильным выводам относительно гипотезы существования эфира, которые в 1905 г. вызвали критику Эйнштейна. Вместе с тем знакомство Хвольсона с опытом профессора Видеманна по созданию многотомного учебника по физике, с практикой его дополнений и переизданий, трудно переоценить.

Вернувшись в 1876 г. в Россию, Хвольсон более 20 лет читал лекции в Санкт-Петербургском университете, профессором которого стал в 1891 г., и одновременно преподавал физику в разных учебных заведениях: в знаменитой Петришуле*, в гимназии Мая, в Техническом

училище почтово-телеграфного ведомства, на Высших женских (Бестужевских) курсах, в Артиллерийских офицерских классах в Кронштадте. Накопив обширный материал по изложению физики, в 1897 г. он выпустил 1-й том своего учебника общей физики, невероятного объема в 630 страниц и с 337 иллюстрациями. Но особенностью учебника не столько в его размере (последующие тома под стать первому: т. II — 700 с., т. III — 676 с., т. IV, 1-я часть — 748 стр., т. IV, 2-я часть — 1030 с.), важно само время его выхода в свет и отсутствие в мире аналогов. Курс физики Хвольсона был весьма современен по содержанию. Рецензию Н.Н.Шиллера, профессора Киевского университета имени св.Владимира, на учебник Хвольсона в журнале «Zeitschrift für Physikalische Chemie» (1899) главный редактор В.Оствальд** сопроводил словами: *К вышеизложенному надлежащему отчету необходимо добавить, что труд Хволь-*

* Петришуле — успешная частная немецкая школа, связанная с протестантской общиной церкви Святого Петра в Санкт-Петербурге. Екатерина II назначила Петришуле в 1783 г. главным педагогическим училищем с преподаванием на немецком языке для русских подданных. Один из самых известных учеников Петришуле — физик Н.Риль, выходец из петербургской русско-немецкой семьи, выпускник 1919 г. В 1945–1950 гг. в рамках советского атомного проекта он внес важный вклад в решение задачи об извлечении металлического урана, был удостоен звания Героя Социалистического труда, стал лауреатом Сталинской премии I степени [10].

** Профессор В.Оствальд, преемник профессора Г.Видеманна по кафедре физической химии Лейпцигского университета, основал при этом университете первый в мире Физико-химический институт, принял участие в создании Германского электрохимического общества. В 1887 г. В.Оствальд вместе с Я.Вант-Гоффом основал «Журнал физической химии». Лауреат Нобелевской премии по химии 1909 г.

сона написан, исходя из более современных представлений, чем любой другой, из числа известных референтам учебников физики, и что его немецкое издание было бы делом, заслуживающим благодарности [11].

«Кризис принципов» классической физики

Курс общей физики Хвольсона по сути представлял собой подобие энциклопедии классической физики, смотр ее экспериментальных возможностей и описание ее теорий на основе классической ньютоновской механики. Первые экспериментальные открытия, необъяснимые с позиций классической физики, — лучи Рентгена (1895) и радиоактивное излучение Беккереля (1896) — удалось в 1-м томе учебника обойти, сославшись на «недостаточную изученность их внутренней сущности». Но как быть с новыми экспериментальными данными: открытием электрона Дж.Томсоном (1897), радиоактивности тория — Г.К.Шмидтом*, М.Склодовской-Кюри и П.Кюри (1898), нескольких видов частиц в ходе радиоактивного распада — Э.Резерфордом (1899), сверхпроводимости — Х.Каммерлинг-Оннесом (1911)? И созданными новыми теориями: квантов М.Планка (1900), относительности А.Эйнштейна, А.Пуанкаре, Г.А.Лоренца, Г.Минковского (1904), ядерной модели атома Э.Резерфорда (1911) и модели атома Н.Бора (1913)? Они (а упомянуты далеко не все) в совокупности представляли собой сокрушительный вызов принципам и представлениям прежней физики. Крупнейший физик того времени Пуанкаре назвал сложившееся положение «серьезными признаками кризиса принципов» классической физики [12, с.663].

Несмотря на это, выход в свет учебника Хвольсона именно в начале периода перемен обернулся удачей для автора. Из-за стремительного роста числа открытий, требующих принципиально иных взглядов, чем представления классической физики, возник резкий разрыв между объяснением новых явлений и новыми теориями, с одной стороны, и уровнем преподавания естественнонаучных дисциплин в университетах и технических вузах, с другой стороны. Курсы физики, дающие макси-



Профессор В.Оствальд, лауреат Нобелевской премии (1909), член-корреспондент Санкт-Петербургской Академии наук (с 1895 г.). Вероятно, 1913 г.
Фото Николая Першайда

мально современную картину знания, были востребованы во многих странах, но они практически отсутствовали. Другое дело учебник Хвольсона, в котором автор нашел возможность внести в свое изложение общей физики «дух современности», как отметил Оствальд. Хвольсон стал, как сказали бы сейчас, ньюсмейкером в области физики для широкого круга читателей. Он с неустанной энергией и непреклонной волей занимался переработкой своего курса, дополняя его разделами о новых открытиях. В течение десятилетий выходили многочисленные переиздания учебника, в которых автор всякий раз сопровождал каждый раздел курса свежей и в большинстве случаев исчерпывающей библиографией. Все это дало основание С.И.Вавилову называть Хвольсона «совершеннейшим летописцем» физики. Когда Орест Данилович не справлялся

единолично, он привлекал коллег и учеников к написанию некоторых разделов курса**. И в этом приеме Хвольсон опередил свое время. На русском языке вышло шесть изданий пятитомного курса, на немецком — три издания, на французском — два и на испанском — одно. Учебник Хвольсона приобрел международную аудиторию. Несколько поколений физиков в разных странах училось и выросло на его курсе физики.

Учебник стал реальным вкладом в европейскую культурную и научную жизнь, проявлением действительности российско-немецких научных связей. Обратимся к замечательному примеру. Э.Ферми, молодой человек 17 лет, штудировал французское издание курса физики Хвольсона во время подготовки к конкурсу для поступления в самое престижное учебное заведение Италии — Высшую нормальную школу в г.Пизе. Вот что он писал своему близкому другу: *Я двигаюсь по Хвольсону быстро и планирую закончить его через месяц или полтора месяца, так как я нашел, что могу около 1000 страниц пропустить [из 5000], поскольку я уже знаю их* [13, р.317]. Учебник 1915 г. издания был огромного объема, он собрал информацию обо всех значительных поворотных пунктах в физике. Ферми мог найти там имена всех ученых, с которыми связан переход от классической физи-

* Профессор Г.К.Шмидт был редактором (1918–1925) второго, переработанного и дополненного, немецкого издания курса физики Хвольсона, первый том которого (в двух частях) вышел в Германии в самом конце Первой мировой войны.

** Например, в написании IV тома (впервые выпущенного в 1907 г., т.е. спустя 10 лет после выхода в 1897 г. I тома) участвовали А.Л.Гершун и А.А.Добиаш (1-я часть), А.П.Афанасьев, К.К.Баумгарт, А.Ф.Иоффе, Л.С.Коловрат-Червинский, Д.А.Рожанский и Д.С.Рождественский (2-я часть).

ки к новой: помимо А.Эйнштейна и М.Планка, там были У.Вин, А.Пуанкаре, Л.Лоренц, М.Абрагам, Г.Минковский, П.Эренфест, М.фон Лауэ, Дж.Рэлей и А.Зоммерфельд. Также цитировались В.Вольтерра и Т.Леви-Чивита, с которыми Ферми вскоре предстояло лично встретиться в стенах Высшей нормальной школы и в Пизанском университете. Вот отрывок из письма Ферми к другу от 18 августа 1918 г.: *Чтение Хвольсона продвигается быстро, и я ожидаю, что закончу его в следующие три или четыре дня. Я очень счастлив, что осуществил изучение прочитанного, потому что оно значительно углубило представления о физике, которые у меня уже были, и научило меня многим вещам, о которых я не имел ни малейшего представления. Теперь я надеюсь, что с этими знаниями буду в состоянии конкурировать в Пизе с некоторой вероятностью успеха* [13, p.317]. Как известно, Ферми не только выиграл конкурс, но и стал первым среди претендентов. Большого пожелать автору нельзя: учебник нашел своего адресата.

Пример Ферми показателен тем, что ему — в будущем одному из главных действующих лиц новой физики — представилась возможность ознакомиться с новыми открытиями по учебнику физики, который был написан автором на основе знаний, приобретенных в двух университетах — Санкт-Петербургском и Лейпцигском. Учебник, который, можно сказать, прошел апробацию русско-немецким научным взаимодействием, несомненно способствовал дальнейшим его, Ферми, академическим успехам. Курс Хвольсона был написан, понятно, не только для гениального Ферми, для которого теория и эксперимент обладали равным весом, но и для многих других талантливых молодых людей из разных стран, стремившихся прийти в физику.

Отметим особенности французского издания учебника



Титульный лист второго, переработанного и дополненного, немецкого издания 1-й части I тома «Курса физики» Хвольсона (1918), вышедшего под редакцией Г.К.Шмидта.



Титульный лист I тома французского издания «Курса физики» Хвольсона (1908). В четвертой строке сверху указано, что перевод на французский язык осуществлялся одновременно с двух изданий учебника — русского и немецкого.

Хвольсона. В то время для студентов старших курсов во Франции не было ни одного подходящего учебника, отражавшего быстро изменяющуюся физику, при общем мнении, что одному автору не под силу охватить надлежащим образом основания столь развитой дисциплины. Однако Хвольсону удалось решить эту проблему [14, с.498]. При этом на выбор французов (традиционно во Франции переводились английские учебники по физике), безусловно, повлияла высокая оценка немецкой научной общественностью работы Хвольсона и признание его учебника в Германии первоклассным трудом. Любопытно, что на титульном листе французского издания, которым пользовался Ферми, указано, что перевод осуществлялся с использованием одновременно русского и немецкого изданий.

В виде приложений к французским томам Хвольсона их издатель — сотрудник А.Пуанкаре, профессор-математик А.Германн, — включил трактаты по аналитической механике своих молодых коллег, будущих членов Парижской академии наук, братьев Ф. и Е.Коссера. Оказалось, что актуальность их научных публикаций, посвященных основам теории упругости, сохраняется до наших дней, по ним и сейчас проводятся международные конференции и симпозиумы [15].

В России до Хвольсона, по словам академика Д.С.Рожественского, буквально не было книг по новой физике. Нечего было читать, и молодежь (он испытал это на себе) *не знала, как добраться до скудных знаний той поры* [16, с.478]. По университетскому учебнику Хвольсона овладевали основами физики множество выпускников университетов и вузов России, талантливая молодежь, будущие выдающиеся ученые. Например, Н.Н.Боголюбов — один из крупнейших математиков и физиков XX в. — познакомился с курсом

физики Хвольсона в 13 лет*. Н.Н.Семенов — выдающийся физико-химик, будущий лауреат Нобелевской премии, основоположник химической физики — слушал лекции Хвольсона во время своей учебы в Петроградском университете в 1913–1917 гг. И было множество других, по образному выражению Рождественского, «введенных в таинства физики словом Хвольсона» [16, с.479].

В Германии в 1899 г. Оствальд вовремя «угадал» мощный потенциал учебника Хвольсона, излагавшего физические явления, эксперимент и теорию, с надлежащей полнотой, с подробной библиографией и на уровне последнего слова науки. Следует отдать дань его проницательности и смелости порекомендовать этот курс физики для перевода на немецкий язык, учитывая характер многотомного проекта и возможные финансовые трудности: первый том, с которым он познакомился, имел объем 1000 страниц, тогда как обычный учебник по физике содержал 300–400 страниц. Однако именно подход Ореста Даниловича — не только написание, но и подвижническая работа по дополнению курса описанием новых достижений науки во всех его многочисленных изданиях и переизданиях — смог обеспечить подъем физики на новый уровень в масштабах всей страны. Переводы на немецкий язык томов курса физики Хвольсона не прерывались даже в период Первой мировой войны. И когда в 1921 г. научные связи России с Германией восстановились, в состав первой делегации, посетившей Германию, был приглашен Орест Данилович.

Перемены

Двадцатые годы XX в. были эпохой рождения и бурного развития нового направления физики — квантовой механики, стали нужны новые учебники, связанные с развитием и приложениями этой важнейшей теории. Курс физики Хвольсона, безусловно, способствовал ускорению взаимопонимания между исследователями, в частности, благодаря объединению новой научной терминологии на русском и немецком языках. И одновременно переводы его учебника стали первыми ласточками в деле продвижения физической литературы из России на Запад. Физика несколько запоздала в этом деле. Первые переводы русской научной литературы по химии — трудов А.М.Бутлерова и Д.И.Менделеева — появились в Европе в конце 70-х годов XIX в., когда Россия сама начала не только создавать собственную химическую литературу, но выступает даже в качестве конкурента на западном рынке научной литературы [17, р.103]. Тем не менее, одним

из первых учебников по квантовой механике, который вышел в Германии в 1929 г. [18], а в Англии в 1932 г. [19], стал учебник «Введение в волновую механику», написанный отечественным физиком Я.И.Френкелем [20]. В России же он был издан только в 1933 г. Наступала эпоха создания курсов физики для новых поколений молодых людей на основе квантовой теории, принимающей законченные очертания. Яркий пример — легендарный курс теоретической физики, задуманный еще в 1930-х годах Л.Д.Ландау и осуществленный им с его учеником и соавтором Е.М.Лифшицем к началу 1960-х, по которому учились и продолжают учиться физики не только в Европе, но и во всем мире [21, с.66–68].

Одновременно изменялся стиль учебников по физике. Акценты смещались в сторону математической составляющей физических задач. Прагматичность XX в. теснила романтизм XIX в. Обратимся к известному высказыванию Г.Герца о трактате Дж.К.Максвелла по электричеству и магнетизму: *Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такого чувства, как будто в математических формулах есть самостоятельная жизнь, собственный разум, — как будто они умнее нас, умнее даже собственного автора, как будто они дают нам больше, чем в свое время было в них вложено* [22, с.482]. Чем не суждение настоящего романтика 19-го столетия? В свою очередь, Р.Фейнман, существенно обогативший теоретическую физику XX в., в письме к Т.Вельтону в 1947 г. писал: *Что я имею в виду под пониманием [в физике]? Ничего глубокого или точного, только быть в состоянии увидеть некоторые из качественных следствий уравнений с помощью метода отличного от того, чтобы решать их подробно* [23, р.391]. В этом замечании отразились черты нового функционального подхода к решению физических задач в XX в.

Один из авторов этой статьи спросил мнение профессора М.И.Каганова о книгах Хвольсона. Последовал ответ: *Когда я в 1946-м году вернулся в университет, ХГУ [Харьковский государственный университет], то однажды в книжном магазине увидел и купил 5-томник Хвольсона. Был очень рад: мне казалось, будущему физику он будет полезен. По дороге домой встретил знакомого физика-теоретика Вениамина Леонтьевича Германа — доктора наук, профессора. Знаком я с ним был. Он вместе с моими родителями был в эвакуации в Кызыл-Орде в Казахстане и преподавал, как и мой папа, в Объединенном Украинском университете (он объединил ХГУ с КГУ [Киевский государственный университет]). Когда Герман увидел у меня в руках Хвольсона, он сказал: «Книги будут хорошо глядеться на полке, но Вы никогда их не откроете». Я не очень поверил, но Герман оказался правым. Не очень переживал: бывая в доме Германа (мы подружились), я убедился, что и на его полке Хвольсон занимает почетное мес-*

* Полотовский Г.М. Штрихи к портрету (К 100-летию со дня рождения Н.Н.Боголюбова) // Математика в высшем образовании. 2009. №7. С.161–172.

то (Из письма профессора М.И.Каганова к профессору П.Буссемеру).

В предисловии ко второму тому первого немецкого издания своего курса физики (1903) Хвольсон подчеркивал, что при подготовке учебника он руководствовался только одной идеей — составить учебник для пользы студентов, но не справочник или руководство для специалистов, которые в широкой области физики уже имеют собственные исследования. Далее он пишет: *Es lag mir nicht daran, daß der Spezialist findet, was er*

sucht, ich strebte nur danach, daß der Studierende findet, was er braucht und daß er braucht, was er findet [24, S.VI] (Для меня было неважным, найдет ли специалист то, что ему нужно, но единственно к чему я стремился, это то, чтобы студенты нашли, то, что им нужно, а найденное было им необходимым — В.Р.). Такая постановка задачи по-прежнему актуальна, как и работа Хвольсона по ее разрешению, даже по прошествии более чем 100 лет. Его «Курс физики», безусловно, стал важным вкладом в общеевропейскую культуру XX в. ■

Авторы выражают глубокую благодарность профессору А.Н.Васильеву за поддержку и ценные замечания. Особая благодарность сотрудникам библиотеки физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, ее главному библиографу М.А.Знаменской, директору В.М.Зуеву, а также сотрудникам библиотеки Кооперативного государственного университета Гера—Айзенах (Duale Hochschule Gera—Eisenach) г-же К.Вольф (K.Wolf) и г-же К.Яних (K.Janich) за помощь и предоставление возможности работы с редкими историческими изданиями по физике.

Литература

1. Guerrier W.I. Leibniz in seinen Beziehungen zu Russland und Peter dem Großen. Leipzig, 1873.
2. Герье В.И. Лейбниц и его век. СПб., 2008.
3. Лазарев П.П. Исторический очерк развития точных наук в России в продолжение 200 лет // УФН. 1999. Т.169. Вып.6. С.1351–1361.
4. Капица П.Л. Ломоносов и мировая наука // УФН. 1965. Т.87. Вып.1. С.155–168.
5. Русаков В.П. Орест Данилович Хвольсон // Исследования по истории физики и механики. М., 2003. С.145–175.
6. Хвольсон О.Д. Автобиография // Физики о себе / Сост. Н.Я.Московченко, Г.А.Савина; отв. ред. В.Я.Френкель. Л., 1990. С.31–34.
7. Bussemer P. Image theory for electrostatic and magnetostatic problems involving a material sphere — Comment // American J. Physics. 1994. V.62. №7. P.657–658.
8. Chwolson O. Über eine mögliche Form fiktiver Doppelsterne // Astronomische Nachrichten. 1924. V.221. №20. P.329–330.
9. Wiedemann G.H. Die Lehre von der Elektrizität. 4 Bände. Braunschweig, 1898.
10. Riehl N. Zehn Jahre im goldenen Käfig. Stuttgart, 1988.
11. Schiller N., Ostwald W. Lehrbuch der Physik von O.D.Chwolson // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1899. Bd.30. H.3. S.575.
12. Пуанкаре А. Современное состояние математической физики и ее перспективы // УФН. 1974. Т.113. Вып.4. С.663–677.
13. Enrico Fermi. His Work and Legacy / Eds. C.Bernardini, L.Bonolis. Berlin; Heidelberg, 2004.
14. Wilson E.B. Review of Chwolson's treatise on physics (French edition) // Bull Amer. Math. Soc. 1912. №18. P.497–508.
15. Mechanics of Generalized Continua: One Hundred Years After the Cosserats / Eds. G.A.Maugin, A.V.Metrikine // Advances in Mathematics and Mechanics. V.21. Berlin, 2010.
16. Рождественский Д.С. Почетный член Академии наук СССР О.Д.Хвольсон // Известия АН СССР. Сер.VII. 1935. №4. С.476–479.
17. Gordin M.D. Scientific Babel. Chicago; L., 2015.
18. Frenkel Ya.I. Einführung in die Wellen Mechanik. Berlin, 1929.
19. Frenkel Ya.I. Wave Mechanics. Elementary Theory. Oxford, 1932.
20. Френкель Я.И. Волновая механика. Ч.1: Элементарная теория. Л.; М., 1933.
21. Ахиезер А.И. Учитель и друг // Воспоминания о Л.Д.Ландау / Отв. ред. И.М.Халатников. М., 1988. С.45–68.
22. Столетов А.Г. Избранные сочинения. М., 1950.
23. Galison S.J., Galison P. Feynman's war: Modelling nature // Studies in History and Philosophy of Science. Pt.B. 1998. V.29. №3. P.391–434.
24. Chwolson O.D. Lehrbuch der Physik. Springer, Heidelberg, 2013.

Гегель, Геккель, Коссут и Двенадцатая заповедь

Критический этюд

О.Д.Хвольсон,
ординарный профессор Санкт-Петербургского университета

Предисловие

Эта книга была мною первоначально написана и издана в 1906 г. на немецком языке (второе издание 1908 г.), так как я полагал, что полемика против писателя, пользующегося огромной популярностью, в особенности среди своих соотечественников, должна появиться на доступном ему языке. Ныне я считаю своевременным появление русского издания. Перевод сделан моей дочерью, В.О.Хвольсон, при моем участии; он снабжен мною некоторыми добавлениями.

*Неподвижные звезды —
это лихорадочная съть небесного свода.
Не может быть больше семи планет.
Но ведь это не соответствует фактам. —
Тем печальнее для фактов.*

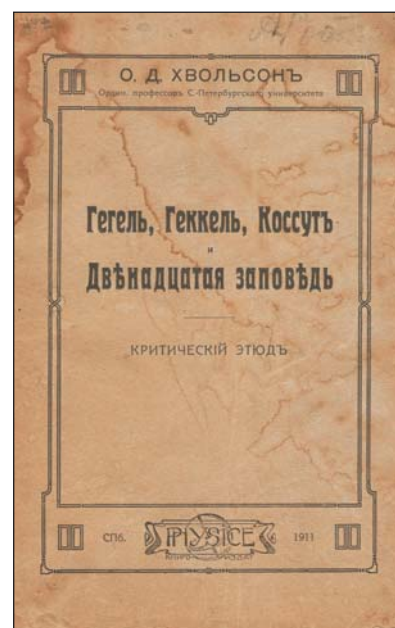
Гегель
(Начало девятнадцатого столетия)

*Кинетическая теория материи не допустима.
Второе начало механической теории тепла
противоречит первому и потому недопустимо.*

Геккель
(Начало двадцатого столетия)

*Закон сохранения масс не что иное, как положение:
целое равно сумме своих частей.
Закон сохранения энергии не что иное, как положение:
причина равна следствию.*

Коссут



Обложка книги О.Д.Хвольсона «Гегель, Геккель, Коссут и Двенадцатая заповедь. Критический этюд». СПб., 1911.

Глава первая Философия и естествознание

§1. **Введение.** В этом небольшом сочинении я намереваюсь показать на нескольких примерах, сколько зла проистекает от того, что некоторые авторы ученых сочинений не соблюдают одной простой заповеди, хотя необходимость ее соблюдения сама собою ясна. Несоблюдение этой заповеди является важнейшею, даже, пожалуй, единственною причиною того странного, почти загадочного обстоятельства, что одно из самых могучих и интересных современных течений человеческой мысли не привело, несмотря на постоянно возобновляемые попытки, к сколько-нибудь заметному, достойному внимания, результату.

Когда читатель прочтет эту заповедь, напечатанную ниже, он улыбнется, пожалуй, даже посмеется над наивным автором, полагающим, что высказывает что-то новое, утверждая, что дважды два — четыре. Против этого я ничего не могу сделать; я должен терпеливо перенести насмешку, надеясь, что при дальнейшем чтении читатель, может быть, и перестанет смеяться, памятуя, что нужно всегда переждать конец, чтобы решить, кто будет смеяться последним, а его смех, по немецкой пословице, самый лучший (Wer zuletzt lacht, am besten!).

Конечно, каждый найдет странным и лишним подробное указание на заповедь, которая оказывается столь же несомненной истиной, как дважды два есть четыре, или — называется четыре, как

говорит Гёте. Но такое указание перестает быть лишним, когда каждый, если его спросить, объявляет эту заповедь несомненно правильной, но постоянно грешит против нее и в своих сочинениях действует так нелогично и неблагоразумно, как будто основой всех его расчетов и умозаключений являлось положение, что «дважды два — пять».

Когда в важнейших случаях вновь и вновь не соблюдается столь элементарная заповедь и повторяется столь невероятная ошибка; когда видишь, что эта ошибка причиняет непоправимый вред, что могучее движение, подававшее самые блестящие надежды, погибает в омуте бесплодных споров, — разве не имеет каждый право сказать: «Но позвольте, господа, ведь вы все забыли, что дважды два — четыре, а не пять! Вы не обратили внимания на совершенно элементарное правило и вследствие этого вместо дружной работы, вместо взаимной поддержки и помощи, которая могла бы приблизить вас к решению высших проблем, ваша работа приводит только к спорам и к озлоблению и к чему-то еще более худшему, о чем мы поговорим впоследствии». На чьей стороне окажутся в этом случае смеющиеся, если уже непременно хотят смеяться, когда следовало бы плакать?

Вот с таким-то случаем мы будем здесь иметь дело!

§2. Время старое. За последнее десятилетие во множестве появились соединяющие дорожки между двумя враждующими лагерями: философия и естествознание стали ближе друг к другу. Здесь не место подробно развивать эту многократно трактованную и за последнее время почти уже надоевшую тему. Мы можем ограничиться немногими словами.

Широкое философское течение когда-то полагало, что свойства мира могут быть найдены априори, без помощи опыта. Эта мысль, несомненно, ошибочна, и громадная умственная работа была бесполезно потеряна для человечества.

Естественные науки шли самостоятельно своей дорогой и подарили нам те бесчисленные открытия, которые останутся на вечные времена характеристикой минувшего столетия. Ободренные своим успехом, они и знать не хотели о той узде, которую стремилась наложить философия; они шли вперед, не уклоняясь от испытанного пути, и наполняли изумленный мир славой достигнутых ими результатов. За ними следовала техника, которая вызвала коренную перемену в условиях жизни человечества. Прогресс естественных наук строился на результатах опыта, основанного на эксперименте и на наблюдении. Но одного опыта оказалось недостаточно. Руководящей нитью при постепенном развитии науки, при дальнейшем искании и открытии, могучим рычагом движения вперед служила теория, основанная на гипотезах. Она одна могла систематизировать материал,

данный опытом, и построить из него те гордые, хотя отчасти и эфемерные научные здания, которые являются указателями состояния науки в данную эпоху. Чистый позитивизм, признающий только опыт, не допускающий проникновения за кулисы чувственно воспринимаемых явлений, и отвергающий всякие гипотезы и теории, так же бессилён создать науку, как и его крайний антипод, чисто спекулятивная, отвергающая всякий опыт философия.

Опираясь на опыт и на теорию, естествоиспытатели строили свои научные здания, которые принадлежат к величайшим творениям человеческого гения.

Не обращая никакого внимания на успехи естественных наук, даже игнорируя их существование, философия шла своими путями, продолжала она работать над теми великими проблемами, над которыми человеческий ум трудится с незапамятных времен. Между этими проблемами найдется многие, не имеющие почти ничего общего с естественными науками. Сюда, несомненно, принадлежат проблемы, относящиеся к теории познания, проблемы формальной логики, многочисленные, хотя и не все, проблемы психологии. Сюда же принадлежат проблемы, относящиеся к области этики и эстетики. Если допустить, что разработка этих проблем необходима, то приходится признать за философией право заниматься ими, не заглядывая в область естественных наук. Но философия не довольствовалась этими задачами; она занималась также и такими, к разработке которых уже приступали естественные науки, или которые они давно решили. И она относилась к этим задачам по-своему, как будто естественные науки и не существовали, или же все ими созданное не имело никакой цены. Но и естествоиспытатели не оставались в долгу. Они не скрывали своей ненависти к философии и уверенности в том, что все, созданное этой наукой, бесполезно и ничего не стоит.

Таким образом развился между двумя могучими течениями умственной работы человечества глубоко проникающий антагонизм. Было бы лишним подробно распространяться здесь об этом антагонизме. Его проявления всем известны, и мы ограничимся немногими намеками. Мы не будем преувеличивать, но не будем и умалчивать; мы назовем, что нужно, настоящими именами. Как назвать те чувства, которые в продолжение многих десятилетий питали друг к другу естествоиспытатели и философы, чтобы выразиться коротко, ясно, откровенно и беспощадно? Это жестокие слова, но они правдивы, и мы не испугаемся их грубости: высокомерие и презрение! К этим двум чувствам прибавилось со временем еще третье, но об этом после.

С такими только что правильно названными чувствами относился естествоиспытатель к философии, гордый своими действительно блестящи-

ми успехами, с полным сознанием своей силы, уверенный в том, что опыт и теория дают достаточное на вечные времена основание для дальнейшего развития его науки. Нужно ли это доказывать примерами, которые, пожалуй, будут иметь характер анекдотов? В широких кругах «философия» и «вздор» представляли тождественные понятия, и при спорах нередко приходилось услышать уничтожающий аргумент: «Ну что вы! Да ведь это — философия!». Другими словами: «Дорогой коллега, ведь вы говорите вздор».

Некий естествоиспытатель был однажды застигнут врасплох своим коллегой, когда он изучал философское сочинение. Коллега, очевидно, подумал, что в мозгах первого появился некоторый дефект; но из вежливости он ограничился замечанием, что жаль, если его уважаемый товарищ тратит свое драгоценное время на чтение философского сочинения; его друг, «извиняясь», указал, что он должен прочесть это сочинение, так как оно содержит сильные нападки на него самого. Так в широких кругах отрицали за философией право на существование и жизнеспособность!

Те же чувства, выше названные правильными именами, преисполняли философа по отношению к естествознанию; но высокомерие было на этой стороне, пожалуй, еще интенсивнее. Ведь философия — *literae literarum**, высшая или даже единственная истинная наука; ведь она — та мать, которая одна только и умеет правильно руководить вечно несовершеннолетней детской толпой остальных наук, сопоставлять добытые ими результаты и давать им правильное освещение. То, что создавали остальные науки, пожалуй, не было лишено интереса, но ведь оно представляло лишь более или менее ценный, сырой материал, и только философия в состоянии правильно построить из него истинные научные здания. В особенности естественные науки составляли *quantite negligible****, и ни один философ не забывался до того, чтобы попытаться поближе познакомиться с добытыми результатами, или, скажем, — с фантазиями этих наук. Иногда случалось, что обсуждался вопрос, принадлежащий к их области. Но как это делалось! Издевательства и насмешки сыпались на голову естествоиспытателя, постыдно и ребячески заблуждавшегося. Его наука осуждалась с невообразимым высокомерием, его самого старались научить, как ему нужно поступать, или, вернее, читателю объясняли, каким образом можно заменить наивные воззрения естествоиспытателя прекрасными, простыми и, разумеется, правильными рассуждениями и объяснениями философа. При этом философ едва ли верил в возможность просветить естествоиспытателя. Ведь его приходилось считать безнадежным и едва ли до-

статочно подготовленным для восприятия истины. Он, очевидно, был убит, и это признавалось достаточным.

§3. Время новое. Настало время новое. Абсолютное взаимное игнорирование прекратилось; состоялось сближение между естествознанием и философией. Обоим стало ясно, что они имеют много аналогичного, даже много общего, хотя бы только в своих целях. И в чем же до сих пор заключается результат этого сближения? Как два одноименных магнитных полюса тем сильнее отталкиваются, чем более они приближаются друг к другу, так и сближение между философией и естествознанием привело в области их одноименных задач лишь к усугублению старого антагонизма, к усилению существовавшего между ними отталкивания. И к двум вышеназванным, в сущности даже приятным чувствам, прибавилось еще третье, имеющее совсем иной характер; оно бушует в человеке и душит его и порывается вылиться в сердитом поступке: чувство озлобления, чувство возмущения!

Указать начало новой эпохи, разумеется, невозможно. Движение начиналось понемногу, и в очень давние времена уже встречаются отдельные его предвестники.

С неожиданною силою это движение вспыхнуло приблизительно 20 лет тому назад. Многочисленные естествоиспытатели стали издавать философские или якобы философские исследования и рассуждения; и многочисленные философы начали публиковать свои естественнонаучные или якобы естественнонаучные сочинения.

В чем следует искать более глубокие причины этого могучего умственного движения, которое не могло не вызывать восторга у всякого мыслящего человека и самые блестящие надежды?

Философ, очевидно, понял, что ему, по различным причинам, было бы бесполезно ознакомиться с работами естествоиспытателя.

Во-первых, оказалось, что многие вопросы, которые разрабатывал философ, тождественны, или весьма близки к вопросам, давно уже интересовавшим естествоиспытателя, при разборе которых он пришел к совершенно определенным результатам, представлениям или гипотезам. Невозможно было по прежнему игнорировать эти работы, не рискуя впасть в слишком заметную односторонность и неполноту при разборе соответствующих вопросов. Некоторыми результатами естественных наук нельзя было пренебрегать уже по той простой причине, что они сделались достоянием всех образованных людей.

Во-вторых, философская критика естественнонаучных исследований давала новый материал философии, стало быть, и новые темы для философов. Это обстоятельство очень важно в такое время, когда число работающих, а потому и конкуренция сильно возросли не только в промыш-

* Средоточие наук (лат.).

** Ничтожно малая величина, нечто, не стоящее внимания (фр.).

ленности, но и в научной области; а потому новые темы возникают весьма кстати и встречаются охотно. И здесь привлекает новизна дела, хотя бы оно и оказалось сравнительно малоценным. Изучение результатов естественноисторических исследований приводило, таким образом, по меньшей мере к расширению данной темы, что во многих случаях являлось для философа нелишним.

В-третьих, оказалось, что естественные науки выработали некоторые весьма важные положения, необыкновенная общность которых давала им, если так можно выразиться, философский характер. Сюда относятся три основных принципа физики: сохранение материи, сохранение энергии и принцип возрастания энтропии. Далее, некоторые законы и гипотезы обладают общим, можно сказать, мировым характером. Сюда относятся, например, закон инерции, закон Ньютона, относящийся к всемирному тяготению, гипотеза об эфире, атомная теория в ее современном виде, и — из других областей — идея эволюции, витализм и т.д.

Наконец, следует указать на тот важный факт, что на почве чистого естествознания разбирались некоторые вопросы, соответствующие как бы пограничной области между естествознанием и психологией. Сюда относятся психофизический закон Вебера—Фехнера и учение об обманах чувств.

Вот приблизительно все, или по крайней мере важнейшие причины, заставившие философа обратиться к области чистого естествознания. Было бы лишним приводить примеры из литературы. Если в «Журнале философии и философской критики» появляется статья «Второе начало энергетике и проблема жизни» или когда знаменитый философ Е.Ф.Гартман пишет книгу: «Мировоззрение современной физики», то этим, думается, новая эра достаточно охарактеризована.

Обращаемся к естествоиспытателю. Где в этом случае лежали настоящие причины того умственного движения, которое, сначала робко выступая, разрослось в могучий, непрерывно расширяющийся поток? Мы и здесь постараемся указать хотя бы лишь самые важные причины.

Мы упомянули выше, что опыт и теория составляли вместе тот фундамент, на котором естествоиспытатели строили свои гордые, хотя подчас и несколько воздушные научные здания. Появление нового, философского, или, вернее, философиствующего направления в естественных науках доказывает, что естествоиспытатель по-прежнему убежден в недостаточности этого фундамента. Несомненно, что на нем можно было построить много прекрасного, в особенности много для техники важного открывалось, изучалось и применялось. Но первичной и внутренней двигающей силой, вызвавшей естественноисторические исследования, вовсе не являлось желание

найти что-либо ценное для техники; этой силой было стремление понять окружающий мир, проникнуть в его тайны, найти ответ на длинный ряд вопросов, последнее звено которого составляет вопрос об отношении внешнего мира к внутреннему миру человека, старинная проблема древней премудрости, вылившаяся в словах: «Познай самого себя».

Исследователь, в уме которого жила и действовала эта сила, не мог удовлетвориться тем, что указывал опыт и чему учила теория или — о чем она фантазировала. Он должен был идти дальше, ибо на каждом шагу возникали перед ним и преследовали его такие вопросы, которых не могли разрешить никакой опыт и никакая теория.

Вопросы теории познания несомненно были первыми, на которые пришлось натолкнуться естествоиспытателю, и они привели его в чуждую ему до того времени область психологии. Каким образом вызывают органы чувств познание внешнего мира? Как объективируется причина раздражений, воспринимаемых органами чувств, в пространстве и во времени? На эти вопросы наталкивал мыслящего исследователя анализ самых элементарных явлений. Мы видим изображение предмета в зеркале. Путем опыта был открыт закон отражения, благодаря которому мы имеем возможность построить место этого изображения. Теория выводит этот закон как следствие из некоторых определенных, гипотетических предположений. Но ни тот закон, основанный на опыте, ни эта теория не могли объяснить, почему мы действительно видим предмет на том месте, где по простому геометрическому построению должно находиться его изображение. Только теория познания, проникая глубже в сущность этого чисто естественноисторического вопроса, могла объяснить этот факт. Здесь дело касается одного из простейших случаев обмана чувств. Дальнейшее изучение таких обманов постоянно приводило ко все большему углублению в область теории познания.

Критика фундаментов представляла второй широкий путь, заставивший естествоиспытателя направиться или заблудиться в области философских рассуждений. Мы ограничимся единственным примером. Одну из основ механики, а стало быть и физики, составляет закон инерции, который гласит, что движение тела, не подверженного никаким внешним воздействиям, происходит равномерно и прямолинейно. Допущенное без критики, это положение кажется простым и совершенно понятным. Но критическое исследование показало, что это основное положение совершенно непонятно и что ясная, недвусмысленная его формулировка невозможна. Здесь не место распространяться об этом специальном вопросе, которому посвящены многочисленные исследования. Мы ограничимся указанием на то, что та прямая, по которой должно было бы двигаться тело,

не может быть определена. Нам понятно представление о прямой на поверхности Земли или в нашей Солнечной системе, в системе неподвижных звезд и т.д. Но это лишь относительно прямые линии, т.е. линии, кажущиеся наблюдателю прямыми, если он неизменно связан с Землей или с Солнечной системой и т.д. и с ними движется. Но в упомянутом законе ничего не сказано о такой именно прямой, ибо речь идет о теле, совершенно лишенном воздействия внешнего мира; ясно, что движение должно происходить по «абсолютной» прямой, а попытка определить эту прямую приводит к лабиринту бесчисленных вопросов, о которых еще неизвестно, находятся ли они по эту или по ту сторону границ человеческого разумения.

К подобным же результатам приводит критический анализ и других многочисленных основ естествознания, даже если мы остаемся в области одной мертвой материи. Живая клеточка возбуждает новый ряд вопросов, которые группируются вокруг великой проблемы жизни.

Изучение законов природы открывает новый источник философских рассуждений. Здесь возникает вопрос о том, где находятся границы приложимости этих законов в пространстве. Действительны ли эти законы только для доступной нашему наблюдению части мира, или же мы имеем дело с законами Вселенной? Можно ли вообще вводить в естественные науки представление о «Вселенной»? Если неблагоприятно допускается такое представление, то перед исследователем возникают безнадежные вопросы о пространстве и времени, о конечности и бесконечности пространства.

Если исследователь задумывается над сущностью открытых им законов, над их значением и над их источниками, то он встречается с теми проблемами, которые группируются вокруг закона причинности.

Если исследователь бросит взгляд на историю своей науки с ее бесчисленными ошибками и заблуждениями, если он взглянет на развалины давно покинутых научных зданий, составлявших когда-то гордость его учителей, и тут же поразмыслит о будущем, когда все, на что он теперь смотрит с гордостью, будет лежать в развалинах, то он невольно поставит себе вопрос: к каким целям стремится его наука и каковы ее задачи? Разыскание явлений и их всестороннее количественное и качественное изучение могут быть только средствами для какой-то определенной, конечной цели. Как формулировать эту конечную цель? Обычный ответ гласит: «Естественные науки должны объяснить явление окружающего нас мира». Наивный ответ, приводящий к труднейшему вопросу: «Что значит объяснить?». Отчаявшись в возможности найти «объяснение» явлений, в каком-либо смысле этого слова, исследователи нередко приходили к печальному результату: ничего не объяс-

нять, но только описывать! И науке грозила возможность превратиться в дерево без корня и без вершины.

Каково, далее, значение теории и гипотезы? С течением времени многочисленные теории были покинуты. Ожидает ли такая же судьба все теории, как современные, так и будущие? Если им всем уже при самом их возникновении предназначена смерть, если им всем суждено эфемерное существование, — то не проще и не логичнее ли было бы совсем от них отказаться и попытаться обойтись без них? Правда, история науки показывает, что теории служили исследователю полезными путеводителями, если они содержали хоть что-либо аналогичное истине. «Когда негр исполнил долг, то он может уходить!» Нельзя ли теории и гипотезы заменить чем-то другим, что оказывало бы те же услуги? И такую замену фактически искали, и лишь вскользь мы заметим, что ошупью написанные дифференциальные уравнения в физике столь же допустимы, как ошупью построенные гипотезы о сущности причин, действующих за кулисами явлений. Если все гипотезы, которые невозможно окончательно проверить, ошибочны, если, как говорит Мефистофель, всякая теория седа, т.е. покрыта сединой, приговорена к смерти, то что же остается от искания истины вне того, что поддается простому наблюдению и описанию? Можно ли вообще найти такую истину? Доступна ли она человеческому разумению или же находится она за границами того, что мы можем понять? Можно ли надеяться отыскать истину или же следует с самого начала удовольствоваться исканием ее теней, ее тусклых, колеблющихся очертаний или даже ограничиваться исканием одного только пути, который ведет к истине, вечно остающейся, однако, за горизонтом ищущего?

Изучение истории развития естественных наук приводит и с другой еще стороны к вопросам философского характера. Прежде всего сюда относится вопрос о происхождении и эволюции основных представлений, или фундаментальных величин, вопрос о том, как эти представления, одно за другим или отдельно, один из другого развивались. С этим тесно связан вопрос, насколько порядок, в котором эти основные представления возникали, необходим или является результатом случая и какую роль здесь играли специфические качества наших органов чувств. В каком порядке возникали бы эти представления при иных обстоятельствах и какой модификации они в этом случае были бы подвержены? Изучение этих и им подобных вопросов весьма важно, так как оно дает понятие о ценности основных представлений, об их абсолютном или относительном значении.

Мы попытались указать по крайней мере некоторые из причин, под влиянием которых естествоиспытатель не удовольствовался областью, посвященной опыту и теории, и вступил в чуждую ему область философских рассуждений. Они вы-

звали могучий, ежедневно нарастающий поток литературных произведений, одно из самых удивительных явлений в области научной эволюции. И здесь было бы излишне приводить примеры. Назовем имена Гельмгольца, Маха, Герца, Больцмана, Оствальда и Геккеля. Заметим, что когда-то столь презренное, почти что неприличное слово «натурфилософия» вдруг стало в высокой степени общеупотребительным, ибо знаменитый естествоиспытатель (Больцман) стал читать лекции о «Принципах натурфилософии», другой (Оствальд) пишет сочинение «Лекции по натурфилософии» и издает журнал «Анналы натурфилософии» (*Annalen der Naturphilosophie*). Начинает издаваться ряд статей «О дидактике и философии естествознания», и вторая из них (Höfler, 1904) — под названием «К современной натурфилософии». В книге, посвященной электротехнике (Heinke и Ebert), находится интересная глава «Общие рассуждения о научном значении вспомогательных представлений». Весьма известный биолог пишет с большим литературным успехом ряд философских сочинений и между ними свои знаменитые «Мировые загадки».

§4. Двенадцатая заповедь. Итак, началось новое время, началось сближение между естествознанием и философией, великое и чудное умственное движение, которое казалось способным возбудить самые прекрасные надежды. Естественные науки и философия, соединившись в общей работе, должны были достигнуть таких научных успехов, которые далеко превзошли бы все созданное этими науками в отдельности. Естественные науки внесли в этот союз свой испытанный метод конкретного экспериментального исследования, а философия — разившееся за многие столетия специальное искусство глубоко проникающего абстрактного анализа. Соединенные, они должны были завоевать мир, начать новую эру в истории умственной работы человечества.

Так оно казалось. Такие надежды были вызваны новым движением в уме обрадованного наблюдателя, и преисполненный напряженного внимания и нетерпения, он стал ждать тех плодов, которые должен был принести этот давно желанный союз.

Но вышло иное, совсем иное! Сближение было только кажущимся. Оно не привело ни к какому союзу, ни даже к отдаленной тени взаимного понимания и доверия, а плоды оказались гнилыми и бесполезными.

Обманутый в своих пылких надеждах, наблюдатель с удивлением и огорчением видит перед собою столь неожиданный результат, и он спрашивает себя: в чем заключается причина?

Он изучает работы философов, имеющих естествоисторическую окраску, и философски окрашенные работы естествоиспытателей, и с особенным интересом он читает критики этих работ и исследований в журналах противной стороны.

И он находит искомую причину, он начинает понимать, почему сближение, встреченное такими радостными надеждами, привело лишь к усугублению старинной вражды; почему к прежним чувствам, которые выше были названы верными именами, прибавилось еще новое — чувство озлобления. И когда ему стала ясна настоящая, внутренняя причина этого бесконечно печального явления, ему захотелось смеяться, как, вероятно, засмеется и читатель, когда узнает, к какому заключению пришел наблюдатель.

Всякие сравнения в большинстве случаев хромают; в них слишком часто замечается нечто как бы за волосы притянутое, нечто утрированное. И все-таки эти сравнения полезны, ибо, даже перешагнув далеко за свою цель, они по крайней мере указывают то направление, в котором эта цель находится.

Мы постараемся несколько насиловать нашу фантазию, вообразив, что зоология и всемирная история сблизились, найдя среди своих проблем некоторые присущие обеим наукам. Сюда можно, пожалуй, отнести проблему эволюции, проблему постепенного развития. Зоолог изучает историю эмбрионального развития (онтогению) единичного существа и родовую историю (филогению) какой-либо определенной породы животных. Историк специально изучает дальнейшую историю развития одной из этих пород — *Homo sapiens*. Таким образом, работа историка является как бы продолжением того, над чем трудился зоолог. Удержим в своем воображении эту фантастическую картину; предположим, что зоология и всемирная история действительно встретились на общей почве, что зоологи занялись историческими вопросами, а историки — онтогенетическими и филогенетическими. Из возникших таким образом работ мы выпишем две «цитаты».

«Цитата» из работы зоолога (появившаяся в журнале, посвященном зоологии):

«Все, что историки до сих пор создали, не имеет никакой научной ценности, так как употребляемый ими метод исследования неправилен в своих основаниях и мог привести лишь к ошибочным представлениям. Вся работа должна быть начата сначала, ибо так называемые исторические, в действительности совершенно недоказанные факты могут быть открыты и правильно поняты только тем методом, которым исключительно мы, зоологи, умеем пользоваться. Всемирная история, очевидно, представляет лишь главу нашей науки. Нужно отказаться от учения о переселении народов, ибо оно противоречит походам Наполеона, как во времени, так и в особенности относительно их направления. Еще большой вопрос, существовала ли когда-нибудь Римская империя, так как известный латинский исследователь Колумб жил в Америке, а не в Италии».

Продолжение да будет предоставлено фантазии читателя!

«Цитата» из работы историка (появившаяся в историческом журнале):

«То, что зоологи до сих пор сделали в области эмбриологии и в особенности филогении, не имеет никакой ценности, так как эти господа совершенно лишены исторического чутья. История развития индивидуума или целого класса животных, очевидно, представляет только часть всемирной истории, и над ней можно работать только лишь теми методами, которые нами, историками, были разработаны и которыми исключительно только мы умеем пользоваться. Теория естественного подбора противоречит факту, что насекомые кладут яйца; поэтому нужно от нее отказаться. Морская змея, питающаяся, как известно, икрой кита, живет только в пресной воде, и по исторически твердо обоснованным причинам петрефакты* могут быть лишь случайной игрой природы».

Терпение, любезный читатель! Ты думаешь, никто не может написать такого ужасающего вздора? На первой странице этой книжки ты найдешь невыдуманные цитаты из двадцатого столетия, которые еще восхитительнее вышеприведенных.

Но вернемся к зоологу и к историку, и спросим: какие чувства должны возбудить вышеприведенные цитаты у другой стороны, предполагая, что они появились в соответствующих, специальных научных журналах и написаны учеными, пользующимися заслуженной известностью. Очевидно, только одно чувство возмущения и озлобления.

Возмущенный, спрашивает историк: «Что общего между переселением народов и Наполеоном? Как можно Колумба считать за римлянина?». А зоолог: «Что общего между учением о естественном подборе и тем фактом, что насекомые кладут яйца? Кто же не знает, что кит — млекопитающее?».

И молчаливый наблюдатель, приветствовавший с энтузиазмом сближение двух лагерей и возлагавший на это великое событие лучшие надежды, огорченно восклицает: «Господа! Прежде чем взять перо, чтобы писать о предмете, отдаленном от вашей собственной специальности, следует этот предмет изучить добросовестно и с большим прилежанием. Сколько долгих годов вам понадобилось, чтобы достичь в вашей специальности того положения, которое вы занимаете? По скольким неверным дорогам вы блуждали в юности, чтобы лишь в более зрелом возрасте прийти к ясным представлениям, к правильным воззрениям, к тому широкому кругозору, который из ясного понимания цельного почерпывает средства проникнуть в детали? Ваши имена произносятся с гордостью; с доверием прислушиваются ученики к вашим словам, ибо долгой работой, тяжелой борьбой вы завоевали себе право учить, это неопределимое право, которого не может даровать ни один король, ни один император. Неужели вы только свою науку считаете сложной и думаете,

что в других науках можно ограничиться полубытыми школьными познаниями или в крайнем случае несколькими популярными статьями, чтобы не только с легким сердцем и свободно судить обо всех вопросах, но также получить право учить и даже просвещать знаменитейших специалистов!

Вы забыли двенадцатую заповедь (одинадцатая уже существует в различных формах): **Никогда не пиши о том, чего ты не понимаешь**.

Нет надобности вам объяснять, что значит «понимать», ибо немало вы требуете на экзаменах от своих учеников, когда им приходится доказывать, что они понимают предмет».

Вот что стал бы сердито говорить наблюдатель, встретив тех завравшихся писак, зоолога и историка.

Смешна ли двенадцатая заповедь? Конечно! Ибо кто же когда-либо сомневался в ее правильности? Как уже было сказано в начале, она столь же сама собой разумеется, как и слова: «дважды два — четыре». Но если зоолог и историк напишут вышеприведенный вздор, то следует им напомнить о забытой ими заповеди.

Мы указали выше, что сравнения вообще хромают. Нужно ли было вообще это сравнение, это фантастическое предположение насчет неудавшегося сближения между зоологом и историком? Да, оно было необходимо, так как оно вполне аналогично печальным результатам сближения между философией и естествознанием. Разница лишь в том, что важнейшие элементы всемирной истории и зоологии давно стали общим достоянием, между тем как этого нельзя сказать, например, о других естественных науках. Главнейшие положения физики, химии, геологии, физиологии и т.д. менее общеизвестны, чем, например, главнейшие факты всемирной истории.

Итак, вот каким оказался результат исследования, которое было предпринято, как выше сказано, наблюдателем, чтобы найти глубокую, внутреннюю причину печальной неудачи, которой кончилось сближение между философией и естествознанием. Обе стороны забыли двенадцатую заповедь: «Никогда не пиши о том, чего ты не понимаешь».

Однако возникает важный вопрос: кто же этот наблюдатель, который берет на себя смелость судить о работах ученых, принадлежащих к двум совершенно различным специальностям? Не забыл ли он сам о существовании двенадцатой заповеди? Если его предмет философия, то он может судить о философских сочинениях естествоиспытателей, но не о естественноисторических работах философов и наоборот, если он сам естествоиспытатель. Это важный вопрос, разрешение которого является необходимым для дальнейшего, и мы ответим на него открыто и честно.

Наблюдатель принадлежит к лагерю естествоиспытателей. Единственное, что он может себе позволить, это критика таких работ, которые от-

* Окаменелости, ископаемые остатки организмов.

носятся к его специальности. Он имел бы, пожалуй, право решить, забывают ли философы двенадцатую заповедь, когда они приступают к обсуждению естественноисторических вопросов по этой специальности. Если он ответит утвердительно, то можно предположить, что то же самое относится и ко всем остальным специальностям из области естественноисторических наук. И, пожалуй, он вправе выразить мнение еще и о тоне, в котором философы обсуждают естественноисторические вопросы.

Однако, он совершенно некомпетентен судить о философских сочинениях, написанных естествоиспытателями. Самое большее, что он может сделать, это также и здесь высказать свое мнение о тоне, так как для этого не нужно быть специалистом.

Итак, казалось бы, что работа наблюдателя с самого начала как бы приготовлена к односторонности, которая должна лишиться ее всякой ценности. Если он выведет из своих исследований только то заключение, что философы забывают двенадцатую заповедь, что они в вышеуказанных случаях говорят о вещах, о которых не имеют никакого понятия, то его, пожалуй, станут считать пристрастным. Даже если ему поверят, все же остается открытым интересный вопрос о том, виновата ли только одна сторона в неудаче сближения или же обе стороны несут одинаковую вину, так как обе согрешили в одинаковом направлении. И он бы не предпринял всей этой работы, и эта маленькая книжка не появилась бы, если бы он не открыл одного факта, который основательно изменил положение дела, и недвусмысленно доказал, что обе стороны виновны. Это открытие заключалось в следующем. В философских работах естествоиспытателей авторы иногда разбирают не только философские вопросы рядом с вопросами их собственной специальности, но затрагивают и обсуждают многое такое, что относится к другим областям, между прочим, и к специальности наблюдателя. И вот тогда резко обнаружилось, что когда некоторые естествоиспытатели выходят из своей области и обсуждают вопросы, относящиеся к другим естественноисторическим специальностям, то они уже забывают о двенадцатой заповеди; они свысока обсуждают и осуждают вопросы, о которых не имеют никакого понятия, о которых они знают только понаслышке, о которых разве что прочли в популярных книгах, неправильно поняв их содержание. А они полагают, что имеют правильное представление об этих вопросах, хотя они и не думали посвятить им того долголетнего труда, которого они требуют от своих учеников, когда дело касается их собственной специальности.

Этим открытием вопрос оказался решенным. Если естествоиспытатель забывает двенадцатую заповедь, как только он переходит в соседнюю область естествознания, то тем более можно было ожидать, что он забудет ее, вступая в столь чуждую ему область философии.

Теперь наблюдатель мог быть уверенным, что его никто не станет считать пристрастным, и таким образом возникла эта маленькая книга.

<...>

Глава вторая Гегель

Любезный читатель, вероятно, уже догадался, как на основании сопоставленных цитат на первой странице, так еще более на основании содержания первой главы, что чисто спекулятивная натурфилософия упомянута в заглавии именем главного ее представителя Гегеля и что здесь ей будет посвящено несколько строк не с намерением лягнуть лишний раз скончавшегося льва. Цель совсем другая: мы желаем показать, что один из современных нам естествоиспытателей ровно сто лет после Гегеля высказывал мысли, которые по внутреннему своему содержанию еще несравненно восхитительнее тех, часто приводимых и много осмеянных изречений великого мыслителя.

В настоящее время всем ясно, что путь, по которому шла натурфилософия, был неверный. Свойства окружающего нас, доступного нашим наблюдениям мира не могут быть качественно или количественно построены априори. Лишь опыт может доставить нам фактический материал. Но это решенные вопросы; путь давно признан ошибочным, и было бы бесцельно и неподходяще к ним возвращаться, вновь их выкапывать.

Более уместными были бы несколько слов в защиту. Следует вспомнить, какое это было время! Следует вспомнить, что естественные науки находились тогда в детском возрасте, что они не имели ни того значения, ни того распространения, которых они достигли только впоследствии. Поэтому и могло казаться, что существуют еще совсем иные пути, приводящие к истине. Старая натурфилософия честно и настойчиво искала такой путь, с громадной энергией она стремилась найти его, и ей казалось, что она его нашла. Снимем шляпу перед гигантской работой ума, и с чувством глубокого уважения произнесем имя давно побежденного противника.

Будем держаться подальше от всякого высокомерия, не забывая, что и естественноисторический метод далеко не способен уберечь исследователя от самых глубоких и опасных заблуждений. Он ведь не имеет другого средства приблизиться к истине, кроме обработки того сырого материала, который околным и сложным путем доставляют ему органы чувств; и он не знает, в какой мере и в каком направлении органы чувств меняют и фильтруют вступающие в них, извне, потоки и сколь многое, может быть важнейшее, они совсем не пропускают.

«Неподвижные звезды — это лихорадочная сыпь небесного свода». Весьма странная фраза! Курьезная фантазия! Обратимся, однако, к некото-

рым из новейших теорий естествоиспытателей (новейшее ведь всегда называется «теорией», и лишь устарев, оно называется «фантазией»). По одной из этих теорий материя состоит из электронов, а электроны из сгущенного эфира. Подставим в вышеприведенной фразе вместо «небесного свода» пространство, наполненное эфиром, в котором распределены неподвижные звезды, т.е. комки материи. Как возникли из эфира электроны, а из них материя? Какие необычайные причины, какие аномальные обстоятельства являлись при этом необходимыми условиями? Какие катастрофы, какие пароксизмы? Может быть, материя действительно лишь болезнь эфира? Такими рассуждениями мы, добродушно, могли бы несколько смягчить бессмыслицу вышеприведенной фразы!

«Не может быть больше семи планет». Эта мысль неверная; путь, приведший к ней, был ошибочен, и факты ее опровергли. Разве это так ужасно? Разве естественные науки действительно уже так непогрешимы, что имеют право в продолжении ста лет смеяться над этой мыслью? Сколько тысяч якобы истин установили естественные науки дедуктивно или индуктивно в продолжение тех же ста лет и сколько положений признавали они соответствующими действительности, хотя они впоследствии были признаны ошибочными? Пути, которые к ним приводили, оказались ложными.

«Но ведь это не соответствует фактам!»

«Тем печальнее для фактов!»

Часто приводимый и сугубо осмеянный диалог! Действительно ли он уж так смешон? Что такое «факт»? Разве так просто и недвусмысленно это понятие? Фактическим следует признать лишь несомненно истинное. Но где провести границу? Кто решит, где должно кончиться сомнение и где колеблющаяся интерпретация наблюдателя должна перейти в твердо установленный факт? Сколько миллионов «фактов» оказались со временем ошибочными? Разве естествоиспытатель, найдя факт, который противоречит его теории, каждый раз немедленно от этой теории отказывается? Не сомневается ли он сначала в самом факте? Если он безусловно убежден в правильности своей теории и все же находит факты, ей противоречащие, тогда он, недолго думая, из этого выведет, что противоречие должно быть кажущимся и что «факты» ошибочны. Это может, например, случиться, когда физик откроет факт, противоречащий закону сохранения энергии. Тогда действительно окажется «*не-чально*» для такого факта.

Старая натурфилософия умерла. Она шла по ложному пути, и это было причиной ее гибели. Бесплезно продолжать над нею издеваться и — *de mortuis aut nihil aut bene**. Снимем шляпу и возложим венок на могилу честной, могучей работы ума, искавшей истину на пути, который казался ей правильным, и не перестанем надеяться, что через сто

лет наши любезные правнуки также не будут издеваться и также возложат венки на могилы ныне господствующих естественноисторических теорий.

<...>

Глава пятая Заключение

Высокомерие и презрение — этими резкими словами мы характеризовали взаимное отношение естествоиспытателей и философов в те времена, когда, полные высокомерия, они и знать не хотели друг друга. Когда, под давлением изменившихся обстоятельств, произошло сближение между ними, тогда и те и другие забыли о двенадцатой заповеди: никогда не пиши о том, чего ты не понимаешь. И к упомянутым чувствам прибавилось новое чувство озлобления. И мы иллюстрировали и доказали сказанное на двух прекрасных примерах. Если бы не существовало примеров другого рода, то пришлось бы отчаиваться в будущем и потерять всякую надежду на новый, великий расцвет естественных наук и философии в новых направлениях. Такой расцвет должен наступить, и он наступит, когда естествоиспытатели и философы согласятся смиренно признать слабые стороны своих односторонних методов и с уважением отнестись к методам исследования, которыми пользуются в другом лагере; когда они научатся понимать друг друга, и когда уже никто не будет забывать о двенадцатой заповеди. Блестящий пример дал Э.фон Гартман в своем сочинении «Мировоззрение современной физики» («Weltanschauung der modern Physik»), показав, как следует сначала изучить отдаленную от собственной специальности область, а затем уже применять к ней соответствующие своей специальности методы исследования. С удивлением и восхищением я изучал этот прекрасный труд, и я не могу не указать на одно обстоятельство: Э.фон-Гартман глубоко и всесторонне понял значение второго начала термодинамики, он поставил его на первый план своего исследования; уже в предисловии он дважды упоминает об этом законе. Так отнесся философ к этому величайшему результату естественнонаучного исследования. А естествоиспытатель Геккель? Тот просто и кратко объявляет, что от этого закона следует «отказаться».

«Лекции натурфилософии» («Vorlesungen über Naturphilosophie») Оствальда и интересные исследования философа Л.В.Штерна могут служить дальнейшими примерами, заставляющими нас с радостной надеждой заглядывать в будущее.

Vivat sequentes!* Будем надеяться, что на своих стягах они все начертят двенадцатую заповедь.

СПб., ноябрь 1910 г.

* О мертвых или хорошо, или ничего (лат.).

* Да здравствуют последователи! (лат.).

Физика

Волоконный лазер на основе висмутового световода

Ученые из Института автоматики и электрометрии СО РАН (г.Новосибирск) в кооперации с коллегами из Научного центра волоконной оптики РАН (г.Москва) впервые продемонстрировали случайный волоконный лазер на основе висмутового активного световода с уникальными физическими характеристиками*.

В отличие от обычных, случайные лазеры (random lasers) могут генерировать излучение без зеркал — за счет многократного рассеяния в усиливающей среде. Такой средой могут служить лазерные кристаллы или полупроводники, размолотые в порошок до микрометровых и субмикрометровых размеров, или суспензии усиливающих красителей с наночастицами. Чтобы возникла генерация, их возбуждают излучением накачки. Уникальность случайных лазеров в том, что в них нет резонатора, который требует высокой точности изготовления оптических элементов, особенно при малых размерах лазера (например, полупроводникового).

Случайную лазерную генерацию, обусловленную явлением рэлеевского рассеяния в волоконных светодиодах, открыли в 2010 г. новосибирские физики**. На ее основе была разработана технология компенсации потерь информационного сигнала при его передаче на большие (сотни и даже тысячи километров) расстояния по пассивным оптическим волокнам.

Но для расширения спектра применений случайных волоконных лазеров их надо сделать более компактными. Для этих целей оптимально подходят не пассивные, а активные световоды, которые используются в обычных волоконных лазерах, легированных, например, эрбием или иттербием. Однако получить в них случайную генерацию до сих пор не удавалось, так как рэлеевское рассеяние в коротких активных волокнах слишком мало.

* Lobach I., Kablukov S., Skvortsov M. et al. Narrowband random lasing in a Bismuth-doped active fiber // Scientific Reports. 2016. Doi:10.1038/srep30083.

** Turitsyn S., Babin S., El-Taber A. et al. Random distributed feedback fibre laser // Nature Photonics. 2010. V.4. P.231–235.

В Научном центре волоконной оптики РАН работают над световодами, легированными висмутом, которые рассматриваются как новый тип активных сред с уникально широким спектральным диапазоном усиления и генерации (от 1.1 до 1.8 мкм). Сегодня их применяют в основном в оптоволоконных линиях связи для создания сверхширокополосных усилителей.

Известно, что повышение концентрации висмута ведет к его кластеризации (слипанию) и, соответственно, к увеличению коэффициента рэлеевского рассеяния, при этом увеличивается и оптимальная длина световода. Однако такие «недостатки» становятся решающим преимуществом в схеме случайной генерации на рэлеевском рассеянии.

Новосибирским и московским физикам удалось объединить технологии случайных резонаторов на рэлеевском рассеянии и висмутовых волоконных световодов и получить лазер, который отличается не только компактностью и простотой схемы, но и уникальными выходными характеристиками. В частности, у него высокий коэффициент полезного действия по лазерной генерации, т.е. велика доля рассеиваемой энергии, превращающейся в лазерное излучение. Ширина спектра (диапазон частот) оказалась в три раза меньше, чем у обычного лазера с двухзеркальным резонатором в том же световоде. Относительно узкий спектр позволяет эффективно генерировать высшие гармоники и преобразовывать частоту излучения в видимый и УФ-диапазон практически на произвольной длине волны. А это открывает возможности для создания новых источников излучения, которые могут найти применение в различных технологиях визуализации — например, в биомедицинской диагностике и лазерных дисплеях.

Особенно важно то, что спектр случайного лазера не имеет характерной для обычных лазеров модовой структуры, это уменьшает влияние так называемых спеклов (мерцающих точек), в результате изображение получается четким и качественным.

Ученые построили теоретическую модель формирования спектра генерации случайного волоконного лазера, объясняющую его уникальные свойства.

По материалам пресс-службы
Института автоматики и электрометрии СО РАН

Космические исследования

Рельеф поверхности Венеры прорывается сквозь толщу облаков

Международная группа ученых из Франции, Германии и России обнаружила взаимосвязь между состоянием верхнего облачного слоя Венеры и рельефом подстилающей поверхности*.

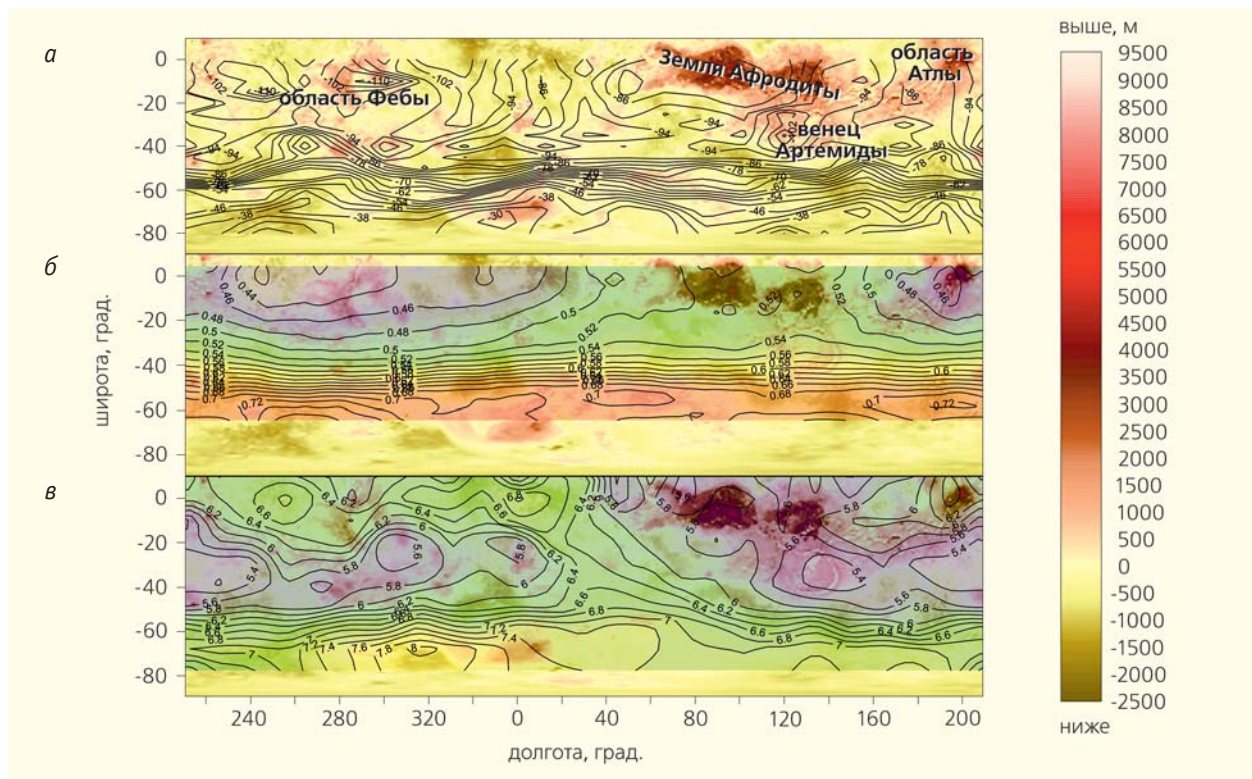
Венера и Земля — две планеты, близкие по размерам и массе. Однако, в отличие от земной, атмосфера Венеры протяженная и плотная, с мощным облачным покровом, состоящим из нескольких слоев, которые содержат сернокислый аэрозоль. Верхний простирается от 50 до 70 км и надежно укрывает поверхность планеты от внешнего наблюдателя. Увидеть детали поверхности можно либо средствами радиолокации, либо на ночной стороне в узких полосах прозрачности вблизи 1 мкм. Другая отличительная особенность атмосферы Венеры — ее суперротация. Вся масса атмосферы обгоняет медленное вращение твердого тела планеты. Максимальные скорости гори-

зонтального потока достигаются на уровне верхней кромки облаков. Из-за суперротации на экваторе атмосфера делает полный оборот за 4–5 земных суток (что соответствует скорости потока на верхней границе облаков около 100 м/с) против 243-суточного периода вращения твердого тела.

Более восьми с половиной лет, с апреля 2006 г. по декабрь 2014-го, на орбите вокруг Венеры работал аппарат Европейского космического агентства «Венера-Экспресс». На его борту в числе прочих приборов были установлены четырехканальная широкоугольная камера Venus Monitoring Camera (VMC) и ультрафиолетовый спектрометр Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Venus (SPICAV), с помощью которых удалось получить беспрецедентные по продолжительности ряды наблюдений верхнего облачного слоя. Ученые из Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) участвуют в обработке данных. По УФ-изображениям Венеры, переданным VMC, получены сведения о динамике атмосферы на уровне верхней границы облаков и об УФ-альbedo (отражательной способности поверхности планеты), по данным SPICAV — информация о содержании в верхнем облачном слое водяного пара (H₂O).

Международный коллектив, возглавляемый Ж.-Л.Берто из Лаборатории атмосферных и космических исследований (Laboratoire Atmospheres, Mi-

* Bertaux J.-L., Khatuntsev IV, Haucbecorne A. et al. Influence of Venus topography on the zonal wind and UV albedo at cloud top level: The role of stationary gravity waves // J. Geophys. Res. Planets. 2016. V.121. P.1087–1101.



Топографическая карта Венеры с наложенными данными: *a* — распределение скорости зональной компоненты горизонтального потока для измерений с местным временем от 12 до 13 ч (карта скоростей смещена на 35° к востоку), *b* — распределение УФ-альbedo (365 нм), *c* — содержание H₂O.

lieux, Observations Spatiales — LATMOS), установил, что зональная компонента скорости горизонтального потока в южном полушарии демонстрирует существенные вариации в зависимости от географической долготы Венеры и коррелирует с рельефом поверхности Земли Афродиты (Aphrodite Terra) — самой большой из трех обширных возвышенностей (материков) Венеры. Эффект наиболее выражен в низких широтах. В частности, в диапазоне 5–15° ю.ш. скорость меняется от 101 до 83 м/с. Замедление потока на 18% наблюдается над Землей Афродиты со смещением на 30–40° по долготе в сторону суперротации. На рисунке (а) оно компенсировано смещением поля скоростей на 35° к востоку для лучшего представления данных. Также в низких широтах к западу от Земли Афродиты наблюдается темный шлейф в ультрафиолетовом (365 нм) альbedo (рис.б), свидетельствующий о влиянии 4.5-километровой возвышенности на вертикальный перенос УФ-поглопителя. И наконец, в той же области наблюдается избыток содержания водяного пара H₂O (рис.в).

Обнаруженный эффект был интерпретирован как результат проявления стационарных гравитационных волн*, возникающих при столкновении горизонтального потока с горными возвышенностями Земли Афродиты. Они распространяются от поверхности вверх, в область более низких давлений, постепенно наращивая амплитуду. На высотах вблизи верхней границы облаков волны начинают разрушаться, вызывая обратное зональному течению движение воздушных масс, это приводит к торможению потока над Землей Афродиты. Однако далее по течению суперротация вновь разгоняет горизонтальный поток, что вызывает эффект «воздушного насоса». Именно поэтому к западу от Земли Афродиты наблюдается интенсификация вертикального переноса воздушных масс и обогащение верхних слоев водяным паром и УФ-поглопителем.

Существенное влияние рельефа поверхности на общую циркуляцию атмосферы Венеры в диапазоне высот от поверхности до 70 км требует внимательного изучения и последующего воспроизведения в моделях.

Ученые из ИКИ РАН продолжают обработку поступившей от зонда «Венера-Экспресс» информации и планируют получить данные о циркуляции атмосферы планеты в глубине облачного слоя.

© Хатунцев И.В., Федорова А.А., кандидаты физико-математических наук

Пацаева М.В., Тюрин А.В.

Институт космических исследований РАН
г.Москва

* Здесь имеются в виду не волны гравитационного поля, известные в астрофизике, а гидродинамические волны, порожденные взаимодействием набегающего потока с неровностями рельефа поверхности; они тоже называются гравитационными. — Примеч. ред.

Геохимия

Новые идеи в геохимии недр и атмосферы Земли

Недавно в журнале «Nature» появилась статья, которая может кардинально изменить наши взгляды на генезис внутреннего строения Земли и ее атмосферы*. В ней представлены измерения взаимодействия оксидов железа с водой при температуре 1800 К и давлении 76 ГПа, что соответствует верхней мантии нашей планеты на глубинах примерно 800 км. Кроме того, проведены теоретические расчеты кристаллического строения и энергетического состояния всех минералов, содержащих железо, водород и кислород при близких давлениях и температурах. Оказалось, что при этих условиях возможна диссоциация воды с образованием водорода и пероксида железа FeO₂, кристаллическая структура которого аналогична пириту FeS₂. Промежуточным продуктом этой реакции служит гидроксид железа FeOOH. Соответствующие химические реакции выглядят так:



Плотность пероксида при этих условиях оказалась близкой к плотности Fe₂O₃, но выше плотности FeO. Это означает, что процесс диссоциации воды мог быть необратимым: легкий водород поднимался к поверхности, а тяжелый пероксид опускался вниз или смешивался с оксидом. Авторы статьи делают вывод о принципиальной возможности обогащения земной атмосферы кислородом на стадии, соответствующей началу тектоники плит. Кроме того, они предполагают, что слой D'' на границе мантии и жидкого ядра состоит из опустившегося туда пероксида железа.

Конечно, для подтверждения столь радикальных выводов потребуется аккуратное моделирование внутреннего строения планеты, меняющееся во времени. А для этого недостаточно измерить состояние системы Fe—O в одной точке диаграммы температура—давление и рассчитать теоретически ее окрестность. Заметим, что и сама возможность рождения водорода в глубинах недр требует независимой проверки. Но вслед за авторами можно пофантазировать, к чему могло бы привести такое моделирование.

Согласно наиболее обоснованной гипотезе образования Луны, наша планета начала формироваться после гигантского столкновения двух протопланет. Их тяжелые железные ядра слились в ядро Земли, Луна же оказалась сложеной в основном из силикатных материалов. Вода, в значительном количестве входившая в состав протопланет, большей частью рассеялась ледяными ос-

* Hu Q, Kim D.Y, Yang W. et al. FeO₂ and FeOOH under deep lower-mantle conditions and Earth's oxygen–hydrogen cycles // Nature. 2016. V.534. P.241–244.

колками вдоль и вокруг земной орбиты, но частично оказалась погребенной в недрах. После остывания поверхности, раскалившейся при столкновении, на Землю и Луну выпала заметная доля осколков (оценка их полной массы составляет не менее 1% земной), которые содержали немало льда, сформировавшего первый океан. Вода также поступала в океан из недр — именно этот процесс обычно рассматривается как главный источник океанских вод. В любом случае проникновение глубинных вод через застывшую кору не могло завершиться быстро.

Отсюда разумно предположить, что часть глубинных вод в горячих недрах начала взаимодействовать с железом и его оксидами, образуя водород и пероксид железа. В первичной восстановительной среде легкому водороду не с чем было взаимодействовать, он мог найти массовый выход на поверхность планеты через только что застывшую кору, подняться в верхние слои молодой атмосферы и улечься в космос. Легко оценить, что земная гравитация недостаточна для его надежного удержания.

Как и когда вышел в атмосферу оставшийся в глубинах избыток кислорода, сказать труднее. Авторы статьи в «Nature» предполагают, что это стало возможным, когда молодая кора раскололась на отдельные плиты, которые стали перемещаться и сталкиваться. Стадия в истории Земли, называемая тектоникой плит, началась, по общепринятым оценкам, 2.1—2.4 млрд лет назад. Примерно к тому же времени относится и так называемая Великая кислородная революция, когда содержание кислорода в атмосфере довольно быстро возросло до нескольких процентов. Конечно, основная часть современного кислорода своим происхождением обязана оксигенному фотосинтезу.

Возможность появления водорода в недрах представляет интерес еще с одной точки зрения, которая авторами не упоминается. Его присутствие могло бы объяснить происхождение кимберлитовых трубок, часть которых содержит алмазы. Как известно, большинство кимберлитовых трубок древние, они были сформированы 200–400 млн лет назад. Однако алмазы древнее, их возраст, по некоторым данным, составляет 2.5–3.5 млрд лет*. Скорости подъема кимберлитовой магмы должны быть по геологическим меркам очень высокими (до 5 м/с), в противном случае алмазы и другие инородные включения (ксенолиты) не сохранили бы свой состав, характерный для глубин мантии**.

Как происходили кимберлитовые извержения? Попробуем обрисовать процессы без количест-

венных оценок. Если водород образовался на ранней стадии развития планеты, то он мог оставаться под твердой корой континентов длительное время, растворяясь в верхней мантии. В восстановительной среде водород химически малоактивен, но при пониженной плотности раствор медленно перемещается вверх, вплоть до точечного контакта с окисленной корой. При этом происходит восстановление водородом трехвалентного железа, которое в заметной доле входит в состав любых горных пород. Реакция $Fe_2O_3 + H_2 \rightarrow 2FeO + H_2O$ становится экзотермической при давлениях, превышающих критическое давление воды 22 МПа (что соответствует глубине примерно 1 км), и ведет к разогреву окружающей породы и локальному выделению высокоактивного водорода с одновременным разрушением твердых пород коры. Водород как бы прожигает себе путь через кору, формируя трубку, расширяющуюся к поверхности. В газе, достигшем поверхности, давление резко падает, поэтому разогретые продукты разрушения коры (кимберлиты) изливаются без взрывов.

Косвенным аргументом в пользу этой гипотезы служит минеральный состав кимберлитов, содержащий минералы двухвалентного железа: оливин, пироксен, ильменит и даже самородное железо. Однако для ее подтверждения необходимы экспериментальные исследования реакции восстановления трехвалентного оксида железа при больших давлениях водорода.

Еще одна интересная статья посвящена земной атмосфере в древние времена***. Авторы изучали структуру вулканической лавы, застывшей 2.7 млрд лет назад. Газовые пузырьки в любой лаве естественно увеличиваются в размерах при подъеме к поверхности, поскольку давление по мере их движения падает, приближаясь к атмосферному. Зная плотность лавы в момент ее застывания, авторы оценили по статистике размеров пузырьков, чему было равно давление атмосферы на уровне океана. По их мнению, с большой долей вероятности оно составляло всего лишь четверть современного давления и никак не могло превышать его половины.

Этот результат подтверждает более раннюю работу почти того же коллектива авторов, посвященную анализу следов дождевых капель, выпавших на поверхность вулканического пепла 2.7 млрд лет назад****. Суть этого исследования в том, что падающие капли воды не растут до любых размеров, поскольку набегающий поток воздуха их дробит. Предельный размер капель зависит только от поверхностного напряжения воды, ее плотности и ускорения свободного падения. Эти величины за миллиар-

* Костровицкий С.И., Спеццус З.В., Яковлев Д.А. и др. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции / Под ред. Н.П.Похиленко. Мирный, 2015.

** Спеццус З.В., Серенко В.П. Состав континентальной верхней мантии и низов коры под Сибирской платформой. М., 1990.

*** Som S.M., Buick R., Hagadorn J.W. et al. Earth's air pressure 2.7 billion years ago constrained to less than half of modern levels // Nature Geoscience. 2016. V.9. P.448–451.

**** Som S.M., Catling D.C., Harnmeier J.P. et al. Air density 2.7 billion years ago limited to less than twice modern levels by fossil raindrops imprints // Nature. 2012. V.484. P.359–321.

ды лет практически не изменились, поэтому и сегодня, и в архее размер капель не превышает 5–6 мм. Однако при пониженном давлении скорость падения капель увеличивается, поскольку сила трения о воздух становится слабее. Поэтому след от удара капли о мягкую поверхность вулканического пепла должен был увеличиваться обратно пропорционально атмосферному давлению, составляющему, по оценкам авторов, не более половины от современного. Так исследования, замечательные своей неожиданностью, помогли установить свойства земной атмосферы миллиарды лет назад.

Однако авторская трактовка состава этой атмосферы и климата позднего архея или раннего протерозоя вызывает серьезные сомнения. Авторы справедливо указывают, что светимость Солнца в те времена составляла только 80% от современной (это явление называют тусклым молодым Солнцем), поэтому пытаются объяснить, почему планета не была полностью покрыта льдом, а капли воды оставались жидкими. Для доказательства они привлекают теории, приписывающие парниковый эффект азоту, у которого по какой-то причине уширились линии поглощения.

Как мне кажется, проблема климата архея в точности противоположна такой постановке. Начнем с того, что эффект тусклого молодого Солнца несколько преувеличен. Во-первых, в бескислородной атмосфере не было озонового слоя, а сегодня он поглощает 4% солнечного излучения. Во-вторых, радиационная температура Земли пропорциональна корню из солнечной светимости. Это означает, что она была ниже современной (255 К = –18°C) лишь на 14–18 К. Кроме того, в отсутствие кислорода атмосфера должна была содержать углерод в виде метана, который обеспечивал очень сильный парниковый эффект. Не забудем и тот факт, что тепловыделение недр было примерно на порядок мощнее современного. В результате, если бы атмосферное давление на уровне моря было бы таким же, как сегодня, то климат архея и раннего протерозоя был бы очень теплым по всей планете. Это противоречит бесспорным свидетельствам того, что многие из оставшихся до наших дней частей суши возрастом 2,8, а затем от 2,4 до 2,2 млрд лет были покрыты ледниками*. Царапины и ледниковые отложения (тиллы и тиллиты), которые оставляют ледники при движении, сохранились в геологических слоях тех времен практически на всех континентах.

На мой взгляд, проблема состоит не в том, как найти объяснение существованию жидкой воды в архее на уровне моря, а в том, как совместить наличие горных ледников с очень сильным парниковым эффектом бескислородной атмосферы. Данные о низком атмосферном давлении архея

предоставляют очевидную возможность для решения этой загадки.

С физической точки зрения объяснение может быть таким. Если основным газом древней атмосферы был, как и сегодня, азот, то температурный градиент вблизи поверхности океана не должен существенно отличаться от современных величин (от 6 до 10°C на километр высоты). Однако высота тропосферы, т.е. ее уровень, где равновесное излучение задает радиационную температуру, была примерно вчетверо ниже сегодняшней. Значительно меньше должна быть и средняя высота облачности, выше которой пары воды уже не вносят заметного вклада в парниковый эффект. Поэтому в разреженной атмосфере архея ледники могли образовываться и сползать даже с невысоких полторакилометровых гор.

© Бялко А.В.,

доктор физико-математических наук

Журнал «Природа»

Палеонтология

Первые находки четвертичных насекомых на юге Западной Сибири

Насекомые — самая богатая по числу видов группа живых существ, распространенная от арктических широт до тропиков, — играют заметную роль практически во всех биоценозах. Многие из них выступают индикаторами состояния окружающей среды, поскольку чутко реагируют на малейшие изменения внешних условий. Так, климатические перемены последних лет привели к появлению одних видов и исчезновению или сокращению численности других.

Четвертичный период, включающий плейстоцен (2,6 млн — 11,7 тыс. лет назад) и голоцен (с 11,7 тыс. лет назад и до современности), характеризуется нестабильностью климата: очень холодные эпохи чередовались с относительно теплыми. О фауне насекомых можно судить по данным ископаемой летописи. В некоторых условиях, например в синих глинах или на торфяных болотах, погибшие насекомые не разрушаются полностью. Сохранившиеся остатки (субфоссилии) представляют собой фрагменты наружного скелета насекомых, состоящего из хитина. Чаще всего в отложениях сохраняются остатки жуков, поскольку их хитиновый покров толстый и прочный, реже — остатки перепончатокрылых, двукрылых, клопов и других групп. Насекомые часто встречаются в четвертичных отложениях северных территорий, особенно в зоне вечной мерзлоты, которая способствует лучшей сохранности материала. Южнее этой зоны они представлены гораздо меньше. Некоторые палеонтологи даже утверждают, что на юге Сибири насекомые не сохранялись. Однако наши исследования опровергают это мнение.

* Чумаков Н.М. Оледенения Земли. История, стратиграфическое значение и роль в биосфере // Труды Геологического института. 2015. Вып.611.

Для поиска четвертичных насекомых на юге Западной Сибири сотрудники Института систематики и экологии животных СО РАН (г.Новосибирск) и Института экологии растений и животных УРО РАН (г.Екатеринбург) организовали несколько экспедиций в район р.Оби (окрестности пос.Калистратиха) и малых рек Алтайского края и Новосибирской обл. Здесь, на хорошо обнаженных обрывистых берегах, можно увидеть горизонтальные слои пород (песков, глины, супесей разного цвета), соответствующие различным условиям осаднения. В некоторых слоях, чаще в синих или серых глинах, содержащих включения растительных остатков, и были обнаружены фрагменты четвертичных насекомых. За несколько лет исследований удалось раскопать более десятка местонахождений на реках Обь, Кизиха, Устьянка, Иша, Чумыш, Сузун, Орда и Чик. Возраст отложений определялся радиоуглеродным методом. Как оказалось, слои в этих местонахождениях образовались в интервале 26–9.5 тыс. лет назад, что соответствует концу плейстоцена и началу голоцена. Удалось собрать несколько тысяч изолированных фрагментов на-



Обрыв с обнаженными слоями четвертичных отложений на р.Иша. 2016 г.

Фото Е.В.Зиновьева



Слой синей глины с прослойками растительного детрита, содержащими фрагменты насекомых. Четвертичные отложения на р.Иша.

Фото Е.В.Зиновьева



Фрагменты жуков из отложений на р.Чик. Жужелица *Vembidion kokandicum*, правое надкрылье (слева); слоник *Stephanocleonus luctuosus*, голова.

Фото Р.Ю.Дудко

секомы. Иногда встречались ассоциированные надкрылья или головы с переднеспинками. Всего в этих местах выявлено 100 видов насекомых, которые относятся преимущественно к жесткокрылым. В основном это долгоносики (Curculionidae) и жуки (Carabidae), доминирующие как по количеству фрагментов, так и по числу видов. Все остальные семейства представлены единично. Собранный материал хранится в коллекции Института систематики и экологии животных СО РАН.

Остатки четвертичных насекомых, найденные в отложениях возрастом 26–9.5 тыс. лет, принадлежат современным видам, но их распространение значительно изменилось. Большинство видов из плейстоценовых отложений на юге Западной Сибири сейчас не встречаются. Одни обитают в тундрах и распространены в северных районах, другие — в сухих степях Центрального Казахстана или горах Южной и Восточной Сибири. Так, жук-олоник *Otiorhynchus karkaralensis*, самый обычный и массовый вид в плейстоценовых отложениях юга Западно-Сибирской равнины, сейчас встречается только в нескольких местах Казахского мелкосопочника. Анализ местообитаний всех обнаруженных видов позволяет провести реконструкцию условий позднего плейстоцена этого региона. В целом климат здесь был значительно холоднее и суше, чем современный, в регионе преобладали открытые тундрово-степные ланд-

шафты. Фауна жуков этих мест не имеет современных аналогов, поскольку климатические изменения привели к исчезновению ландшафтов плейстоцена вместе с уникальным комплексом видов. Однако эти виды не вымерли, а сохранились в тундрах и степях Северной Азии, войдя в состав современных фаун.

Важным научным достижением стало обнаружение на равнине видов бескрылых насекомых из родов *Coniocleonus*, *Stephanocleonus*, *Eremochorus* и *Otiorhynchus*, ныне распространенных изолированно в котловинных степях Алтае-Саянской горной системы. Яркий пример — различные виды долгоносиков из рода *Stephanocleonus*: так, *S.luctuosus* сейчас живет только в Хакасии, *S.prasolovi* — в степях Центрального Алтая, а *S.suvorovi*, *S.isochromus* и *S.tschuicus* распространены на Юго-Восточном Алтае и в сопредельных районах Тувы и Монголии. Тот факт, что они обитали совместно, позволяет по-новому взглянуть на историю формирования фаун этого региона.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-04-01049-а).

© Легалов А.А.,

доктор биологических наук

Дудко Р.Ю.,

кандидат биологических наук

Институт систематики и экологии животных СО РАН

г.Новосибирск

История науки

А.Г.Ваганов. НАУКА — ЭТО ТО, ЧЕГО НЕ МОЖЕТ БЫТЬ: СБОРНИК ИНТЕРВЬЮ УЧЕНЫХ. М.: Издательство «Независимой газеты», 2016. 436 с.

Книгу составляют интервью, которые за последние 20 лет взял автор у известных ученых. Все тексты в разное время были опубликованы в газетной периодике. Однако, готовя данную публикацию, интервью были заново отредактированы, исправлены и дополнены, так что получился существенно более полный вариант бесед. Книга — интересный документ специального направления историко-научных исследований, сложившегося в последнюю четверть века, — устной истории науки. Интервью организованы в пять тематических глав, в качестве названия которых использованы палиндромы (автор полагает, что наука насквозь рефлексивна и ей свойственны ирония и самоирония, что отличает науку от лженауки). Внутри глав тексты расположены в хронологическом порядке, что позволило выстроить связи и переключки гипотез и результатов исследований у независимо работающих ученых. В интервью и в беседах за круглым столом рассмотрены вопросы судьбы российской науки в 3-м тысячелетии и истории крупных физических проектов XX в., проблемы астрофизики, возникновения жизни, генетики и молекулярной биологии, антропологии и психологии, а также математики.



Какой водой лучше утолять жажду?

В.И.Иванов-Омский,
 доктор физико-математических наук
 Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе РАН
 Санкт-Петербург

Если задаться вопросом, в какой воде больше всего нуждается человек или какая вода легче всего утоляет жажду, то ответ на него нужно искать на клеточном уровне. Известно, что процессы обмена, обеспечивающие жизнедеятельность организма, основаны на способности клеток пропускать через свою оболочку (мембрану) молекулы воды и растворенные в ней необходимые для поддержания жизни вещества, а также выводить отработанную воду обратно. Добавим некоторые подробности этого процесса и начнем издалека.

Каждая клетка — это в первую очередь вода, но вода не просто «сидит» в клетке, а движется непрерывно через ее оболочку весьма организованным образом. Внешняя оболочка клетки представляет собой полупроницаемую мембрану, образованную липидными слоями, которые способны пропускать некоторое количество воды. Однако скорость и интенсивность такого рода водообмена при обычном диффузионном механизме была бы явно недостаточна для полноценного функционирования клетки. Уже в XIX в. было замечено, что воду клеточные мембраны проводят через себя с гораздо большей скоростью, чем другие растворители. А в середине 20-го столетия ученые осознали: клетка не просто пропускает воду через свою мембрану — она ее буквально высасывает из межклеточной среды в головкружительном темпе. Не поняли ученые только одного: как она это делает? И не понимали до тех пор, пока Питер Эгр, американский профессор, медик и молекулярный биолог, не обнаружил в конце 90-х годов специальные белковые каналы — водопроводящие поры, названные им аквапоринами (от лат. *aqua* — вода и греч. *πορος* — проход, отверстие). Именно эти каналы и отвечают за вход и выход воды в клетках. За их открытие Эгр удостоился в 2003 г. Нобелевской премии по химии, которую он разделил с Родериком Мак-Кинноном [1]. Открытые Эгром аквапорины стали биохимическим фундаментом для развития многих важных областей физиологии и медицины. Подобные белки, способные проводить $3 \cdot 10^9$ молекул воды в секунду

в расчете на каждый мономер, есть во всех без исключения живых клетках. У человека имеется не меньше 11 вариантов этих белков. Физиологическая роль аквапоринов особенно бросается в глаза в почках, через которые в сутки проходит от 150 до 200 л воды.

На рис.1 показан проход молекул воды через аквапориновый канал. Канал аквапорина напоминает по форме гантель (или песочные часы). Он состоит из внешней и внутренней воронок и соединяющей их узкой и длинной поры. Поверхность воронок образована в основном полярными аминокислотными остатками. На ней происходит первичный отбор молекул воды и их кластеров с последующим освобождением молекул из кластеров за счет разрушения Н-связей и переключения последних на атомы белка. В области перехода внешней воронки в пору просвет

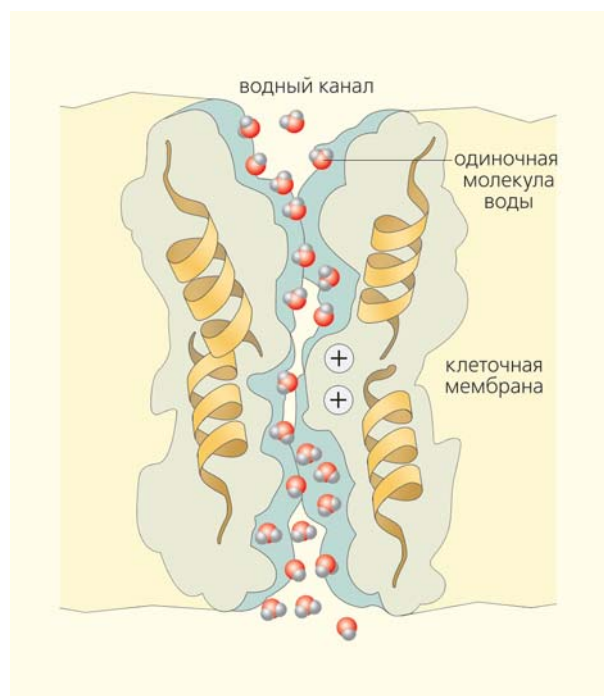


Рис.1. Структура аквапоринового канала, встроенного в оболочку клетки.

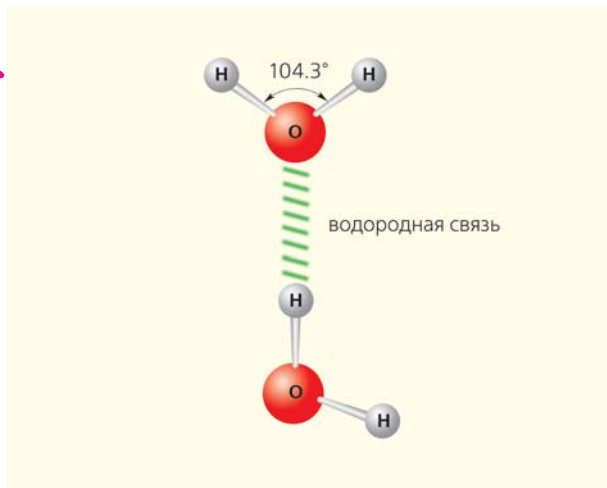


Рис.2. Схема образования простейшего водного кластера.

канала резко сужен — до размеров порядка 0.2–0.3 нм, что примерно соответствует размерам молекулы воды, и диаметр сужения позволяет пройти через него только одиночным молекулам. Барьером для заряженных частиц типа протона служит сильный диполь, своим положительным зарядом расположенный в центре белка. Бо-

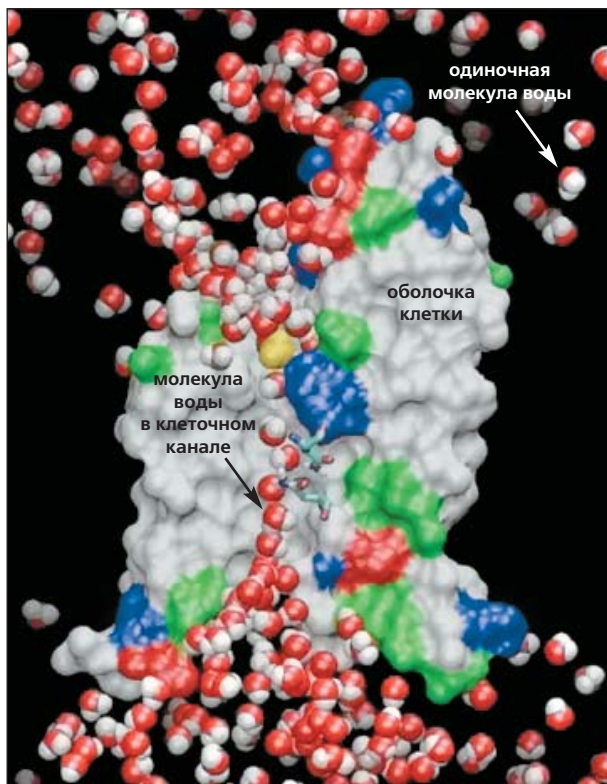


Рис.3. Процесс проникновения воды в полость клетки. Нетрудно видеть, что туда способны попасть только одиночные молекулы. Многомолекулярные кластеры воды «стоят в очереди», пока тепловое движение их не разрушит.

лее полные сведения об этих чудесных белках — аквапоринах — можно получить в обзоре [2].

И вот в этом процессе транспорта через клеточную оболочку проявляются особенности молекулярной структуры воды, которая продолжает исследоваться до сих пор, о чем свидетельствуют многочисленные обзоры (см., например, [3]). Тут надо пояснить, что это за кластеры, упомянутые выше. Дело в том, что реальная формула жидкой воды отнюдь не H_2O , как принято считать, а $(H_2O)_x$, где x измеряется в различных условиях десятками и сотнями, — благодаря объединению молекул воды в молекулярные ансамбли под действием водородных связей. Напомню, что в воде атом водорода соединен не только с «собственным» атомом кислорода (ковалентной связью с энергией 492 кДж/моль), но и с кислородом соседней молекулы. Такая межмолекулярная связь, именуемая водородной (Н-связь), будучи слабее ковалентной (ее энергия порядка 20 кДж/моль), превышает, однако, по силе ван-дер-ваальсово взаимодействие, которое обуславливает конденсацию большинства жидких тел. Именно агрегирование отдельных молекул воды посредством водородных связей в так называемые кластеры $(H_2O)_x$ и порождает уникальность свойств этой жидкости и ее молекулярной структуры.

Простейший молекулярный кластер, образованный двумя молекулами H_2O (димер), показан схематически на рис.2. Величина x в формуле $(H_2O)_x$, естественно, определяет размеры водного кластера и, соответственно, возможность попадания воды внутрь клетки через поры мембраны, образующей ее оболочку. Если кластер водных молекул, приближающийся к клеточному каналу, превышает последний по размеру, вхождение воды в полость клетки задерживается до тех пор, пока тепловое движение не разрушит первый до размеров, достаточных для проникновения в клеточные каналы. Энергия Н-связи всего примерно в пять раз больше энергии теплового движения молекул при комнатных температурах. Этому соотношению Н-связь как раз и обязана своей ролью в живых и растительных объектах, снабжая их необходимой гибкостью, способностью легко перестраиваться, разрушаться и восстанавливаться. Прибывающие на старт к водному каналу более крупные (по сравнению с его диаметром) агрегаты типа многомолекулярных кластеров воды должны «ожидать», когда тепловое движение их разрушит. И это препятствует утолению жажды. Ситуация на рис.3 соответствует нормальной температуре человеческого тела, и «очередь» на вхождение в полость клетки невелика, поскольку в таких условиях преобладают малоразмерные молекулярные кластеры. Когда же температура воды падает, приближаясь к точке замерзания при $0^\circ C$, кластеры включают уже в себя сотни молекул воды [3]. Вода в состоянии, способствующем укрупнению кластеров, теряет свои функции

универсального переносчика продуктов клеточного обмена, и поэтому она не может полноценно утолять жажду.

Как же можно добиться того, чтобы вода поила нас эффективно? Самый простой путь — повысить ее температуру. Действительно, сила Н-связи в молекулярных кластерах при нагревании становится недостаточной, чтобы противостоять тепловому движению, и происходит их распад. В первую очередь разрушаются крупные кластеры водных молекул, которые по геометрическим соображениям при более низких температурах не могли проникнуть в клетки и скапливались у их входа. Таким образом, при нагревании воды ликвидируются своеобразные молекулярные пробки на входе в клетки и вода попадает в полости клеток, утоляя тем самым жажду всего организма. Конечно, температура воды не должна быть слишком высокой, чтобы не сворачивались протеины. Организм следит за этим и подает тревожный сигнал, вызывая ощущение ожога. Мораль сей повести такова: от жажды легче всего избавиться с помощью подогретой воды, например горячего чая. Недаром в южных районах так распространен обычай пить его в жару. Следуя же стремлению попить в жару холодной водички, мы жажду не утолим, а лишь избежим перегрева организма.

Но есть и другой, не менее эффективный способ бороться с жаждой, не нагревая воду, а даже ее охлаждая. Имеется в виду газирование воды: неслучайно в горячем производстве, например в металлургических цехах, полагается ставить аппараты газированной воды. Это, конечно, плод жизненного опыта, как и привычка пить в жару горячие напитки, но современные представления о структуре воды подтверждают разумность такой практики. Действительно, размеры кластеров молекул воды ограничиваются не только температурой, но и их близостью к поверхности воды. В поверхностных слоях воды концентрация Н-связей заметно понижается, так как для реализации их устойчивой системы требуется трехмерное окружение молекул, а водородные связи поверхностных молекул воды направлены только вглубь, и этого недостаточно, чтобы формировались крупные кластеры. Раз концентрация Н-связей на поверхности воды меньше, чем в объеме, молекулы с поверхности легче проникают в полость клетки. А в газированной воде выделяющийся газ образует пузырьки, что увеличивает долю поверхности в окружающей их воде. Чем сильнее газирована вода, тем меньше размер пузырьков и тем больше их число в единице объема жидкости, т.е. тем ниже концентрация Н-связей. Эффективность проникновения такой воды в полость клетки выше. Этот результат равно достигается в случаях как искусственного, так и естественного газирования минеральных вод. Особо следует отметить природные лечебные воды с запахом сероводоро-

да. Запах возникает из-за гниения микроорганизмов, а выделяющиеся при этом газы газифицируют воду, создавая чисто механический эффект облегченного проникновения такой воды и растворенных в ней веществ в полости клеток организма. У знаменитых трускавецких вод на Западной Украине их свойства сохраняются недолго, пока все микроорганизмы не разложатся. Поэтому такая вода полезна только свежая, практически прямо из источника, а ее транспортировка на значительные расстояния невозможна. Аналогичная ситуация имеет место и в случае сероводородных мацестинских ванн, газирование которых облегчает проникновение целебных веществ внутрь тканей организма больного. Впрочем, какой бы механизм насыщения газами ни осуществлялся в случае минеральных вод, целебность их приема внутрь или принятия соответствующих ванн имеет, по-видимому, одну причину.

Особенно следует отметить свойство холодной газированной воды. Холодная вода охлаждает, а пузырьки разрушают пробки у ворот в клетки. Однако это не относится к различным сладким напиткам типа лимонадов или кока-колы. Как правило, чем больше их пьешь, тем сильнее хочется пить (тут срабатывают иные механизмы, связанные с углеводным обменом). Но нужно помнить, что газировка таит в себе и определенную опасность. Попадая в организм, ее газы создают избыточное давление в различных отделах пищеварительного тракта. И если какие-то его части поражены болезнью, это давление вызовет болевые ощущения или даже нежелательные осложнения. То же относится и к детскому организму с его неокрепшим пищеварительным трактом. В этом смысле подогрев воды — более универсальное средство утоления жажды. Как тут не вспомнить о старинной русской традиции попивать чай из пышущего самовара, наливая напиток в блюдечко. Типичная сценка из прошлого изображена на картине известного иллюстратора исконно русских обычаев, современной художницы М.С.Молодых (рис.4). Здесь умело схвачены все особенности процедуры. Изложенное выше позволяет объяснить их во всех деталях. Почему из самовара? Да потому что в нем непрерывно поддерживается кипение воды и, следовательно, идет парообразование, т.е. рождение пузырьков. А почему из блюдечка? Да чтобы не обжечься — для этого сдувают пар с поверхности. Если просто ждать, чтобы чай остыл, целебность процесса исчезнет. Полотенце свидетельствует о том, что такая процедура успешно способствует замене отработанной в клетках воды (пот) на свежую воду, легче проникающей с помощью пузырьков в полость клеток. Баранки и прочая снедь служат для пополнения клеток питательными веществами, вымываемыми с потом. Гостеприимные хозяева недаром приглашали «пить чай до седьмого полотенца». На Руси существовала традиция пить чай до того момента, пока седьмое по счету полотенце не станет мок-



Рис.4. Картина М.С.Молодых «Чаепитие на Руси».

рым от пота. Последнее подразумевало очень долгое чаепитие, до пота, который этим самым полотенцем и вытирали.

Итак, какую воду пить, зависит от того, какого эффекта желают достичь: охладиться в жаркую погоду или утолить жажду. В последнем случае у нас две возможности: горячая вода (из самовара с блюдечка, чтобы не обжечься) или газированная, но желательно без сахара. Вот так современная наука подтверждает правильность древней русской привычки наших предков попивать чаек из самовара и из блюдечка... А вот холодная вода для разгоряченного тела опасна — способна погубить даже коня. Опытные кавалеристы никогда не позволят разгоряченному коню испить водички из речки. ■

Литература

1. *Agre P.* Aquaporin water channels (Nobel Lecture) // *Angewandte Chemie International Edition*. 2004. V.43. №33. P.4278–4290. Doi:10.1002/anie.200460804.
2. *Шатигузов А.Ю.* Аквапорины: строение, систематика и особенности // *Физиология растений*. 2004. Т.51. №1. С.1–11.
3. *Chaplin M.F.* What is liquid water // *Science in Society*. 2013. V.58. P.41–45.

ПРИРОДА

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы
М.Б.БУРЗИН
Т.С.КЛЮВИТКИНА
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
М.Е.ХАЛИЗЕВА
О.И.ШУТОВА
А.О.ЯКИМЕНКО

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод
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 21.09.2016
Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная. Офсетная печать
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2
Тираж 310 экз.
Заказ 661
Цена свободная

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

в следующем номере



Падение капли в воду, сопровождаемое характерным плеском, знакомо практически всем — попадавшим ли под дождь, принимавшим ли ванну. О феномене рассуждали еще античные философы, а систематическое его изучение началось в конце XIX в. и продолжается в наши дни на базе самой современной техники: используются яркие источники света, высокоскоростные видеокамеры, микрофоны, гидрофоны, различные датчики. В таком простом на первый взгляд явлении оказываются переплетенными процессы как атомно-молекулярного, так и макроскопического масштаба. Детальный анализ фото- и видеок кадров раскрывает многообразие происходящих событий: образование пелены, выбрасывание струек, углубление каверны, рост и спадание венца. Теоретическое объяснение эффектов требует решения сложных систем самосогласованных уравнений со многими параметрами, что способствует прогрессу гидродинамики, а акустические изыскания служат задачам дистанционного контроля в метеорологических и других (в том числе военных) целях.

Чашечкин Ю.Д. КАПЛИ: КОРОНЫ, ВСПЛЕСКИ, ЗВУКИ...

