

ISSN 0032-874X

# ПРИРОДА

8 17



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

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

доктор биологических наук **А.С.Апт**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Арискин**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **П.И.Арсеев**, **О.О.Астахова**, доктор биологических наук **Ф.И.Атауллаханов**, член-корреспондент, доктор юридических наук **Ю.М.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), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Леин**, член-корреспондент, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов** (**Sh. Mitalipov**, США), доктор геолого-минералогических наук **Т.К.Пинегина**, доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, кандидат географических наук **Ф.А.Романенко**, 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 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. Сибирская лягушка после зимовки в оз.Клешенском (Амурская обл.).

См. в номере: **Берман Д.И., Булахова Н.А., Балан И.В.** *Самая сибирская лягушка.*  
Фото Н.А.Петруниной

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Вершина вулкана Ключевской прикрыта слоистой облачной «шапочкой», появившейся в результате приближения циклона к берегам Камчатки.

См. в номере: **Быкасов В.Е.** *Вулканы и облака.*

Фото В.Е.Быкасова



«Наука»

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

**В НОМЕРЕ:****3 Д.И.Берман, Н.А.Булахова, И.В.Балан**  
**Самая сибирская лягушка**

Сибирская лягушка заселила холодные регионы Сибири отнюдь не благодаря выдающейся холодоустойчивости — она не переносит температуры ниже  $-2.5^{\circ}\text{C}$ . Колонизации, вероятно, способствовала удивительная для амфибий адаптация — способность зимовать в водоемах с крайне низким содержанием растворенного кислорода.

**15 Е.Г.Мирлин**  
**Тектоника плит: что дальше?**

По прошествии более чем полувека с начала революционных преобразований в геологии, обусловленных появлением тектоники плит, накопилось много фактов, которые показывают, что литосфера обладает свойствами, присущими нелинейным природным системам.

**24 Р.Г.Джамалов, Т.И.Сафронова**  
**Современные водные ресурсы Восточной Сибири**

В течение последних десятилетий в Восточной Сибири наблюдается существенное потепление. Растет температура воздуха, увеличивается количество атмосферных осадков. Попробуем проследить, как эти изменения отражаются на величинах поверхностного и подземного водного стока на территории бассейна реки Лены.

**32 А.Н.Махинов, М.В.Крюкова, В.В.Пронкевич**  
**Ульбанский залив**

Ульбанский залив — один из самых труднодоступных участков побережья Охотского моря. Его берега и акватория представляют собой уникальные природные экосистемы со множеством редких видов животных и растений. Создание здесь особо охраняемой природной территории позволит сохранить необыкновенные ландшафты.

**44 И.Н.Гансвинд**  
**Космическая диагностика климатической системы Земли**

Глобальные спутниковые наблюдения на протяжении десятилетий позволили проследить процессы в атмосфере, океане и криосфере, сопровождающие изменение климата. Систематизация и усвоение в моделях огромного объема взаимосвязанных данных позволит снизить уровень неопределенности в сценариях эволюции климата.

**58 А.А.Никонов**  
**Балтика: тысячелетний катаклизм**

В письменных и фольклорных источниках у разных народов и на разных землях средневековой Балтики обнаружены сведения, отражающие некое сильное водное возмущение экстраординарного характера, которое произошло на рубеже 1-го и 2-го тысячелетий.

**Времена и люди****68 Л.Я.Боркин**  
**Знаменит, но малоизвестен: академик П.С.Паллас, ученый и путешественник****76** **Новости науки**

Происхождение самых мощных сверхновых. **Е.И.Сорокина, С.И.Блинников (76)**. Захват света цепочкой диэлектрических наночастиц. **А.Ф.Садреев (77)**. Характеристика поверхностных волн по спутниковым изображениям солнечного блика. **М.В.Юровская, В.Н.Кудрявцев (78)**. К проблеме происхождения скифов. **А.А.Мовсесян (80)**.

**Рецензии****81 Р.А.Фандо**  
**Петр Иванович Лисицын: судьба ученого на фоне эпохи**  
(на кн.: О.Ю.Елина. У истоков российской селекции и семеноводства. Петр Иванович Лисицын на Шатиловской опытной станции и Госсемкультуре)**84** **Новые книги****85** **Объявления****В конце номера****86 В.Е.Быкасов**  
**Вулканы и облака**

## CONTENTS:

### 3 **D.I.Berman, N.A.Bulakhova, I.V.Balan**

#### **The Most Siberian Frog**

*Siberian wood frog had colonized cold regions of Siberia not nearly due to the outstanding cold resistance, because it can not handle temperatures below  $-2.5^{\circ}\text{C}$ . An adaptation amazing for amphibians — the ability to winter in reservoirs with extremely low dissolved oxygen concentration — probably worked towards the expansion to Siberian territories.*

### 15 **E.G.Mirlin**

#### **Plate Tectonics: What Next?**

*After more than a half-century since the beginning of revolutionary changes in geology due to the emergence of plate tectonics many facts have been accumulated showing that lithosphere has the characteristics inherent in nonlinear natural systems.*

### 24 **R.G.Dzhamalov, T.I.Safronova**

#### **Modern Water Resources of Eastern Siberia**

*Over the past several decades Eastern Siberia has experienced significant warming, in particular rising air temperature and increasing rainfall. Let's try to reveal how these changes are reflected on the values of the underground and surface water run-off on the territory of Lena River basin.*

### 32 **A.N.Makhinov, M.V.Kryukova, V.V.Pronkevich**

#### **Ulban Gulf**

*Ulban gulf is one of the most hard-to-reach locations of the Sea of Okhotsk coast. Its shore and water area present unique natural ecosystems with a variety of rare animal and plant species. Creation of a specially protected territory will allow to preserve these extraordinary landscapes.*

### 44 **I.N.Gansvind**

#### **Space Diagnostics of the Earth's Climate System**

*Global satellite observations over the course of decades has allowed to unravel the atmosphere, ocean and cryosphere processes that accompany the climate change. Systematization and assimilation of huge amount of interconnecting data in computational models will let to reduce the uncertainty level in scenarios of climate evolution.*

### 58 **A.A.Nikonov**

#### **Baltic: Millenium-long Cataclysm**

*In written and folkloric sources of different nations and territories of Medieval Baltic some data was found reflecting a certain powerful extraordinary water disturbance that had happened at the turn of II century.*

## Times and People

### 68 **L.J.Borkin**

#### **Well-known, But Obscure: Academician P.S.Pallas, a Scientist and a Traveller**

### 76

## Science News

Origin of the Most Powerful Supernovas. **E.I.Sorokina, S.I.Blinnikov** (76). Light Capture by a Chain of Dielectric Nanoparticles. **A.F.Sadreev** (77). Characterization of Surface Waves Using Satellite Images of Sun Glint. **M.V.Yurovskaya, V.N.Kudryavtsev** (78). To the Problem of the Scythians' Ancestry. **A.A.Movsesian** (80).

## Book Reviews

### 81 **R.A.Fando**

#### **Pyotr Ivanovich Lisitsyn: Scientist's Destiny Against the Background of the Epoch**

(O.Yu.Elina. At the Origins of Russian Selection and Seed Breeding. Pyotr Ivanovich Lisitsyn at Shatilov Agricultural Experiment Station and at Gossemkul'tura)

### 84

## New Books

### 85

## Advertisements

## End of the Issue

### 86 **V.E.Bykasov**

#### **Volcanoes and Clouds**

# Самая сибирская лягушка

Д.И.Берман<sup>1</sup>, Н.А.Булахова<sup>1,2</sup>, И.В.Балан<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт биологических проблем Севера ДВО РАН (г.Магадан, Россия)

<sup>2</sup>Томский государственный университет (г.Томск, Россия)

<sup>3</sup>Государственный природный заповедник «Хинганский» (пос.Архара, Амурская обл., Россия)

Сибирская лягушка (*Rana amurensis*) — самый северный в Азии вид бесхвостых амфибий. Какие адаптации позволяют ей жить в наиболее холодных регионах Сибири и Дальнего Востока? Предполагалось, что сибирская лягушка — одна из наиболее холодоустойчивых амфибий (наряду с сибирским углозубом). Однако это мнение оказалось ошибочным: лишь часть особей переносит продолжительное охлаждение до  $-2.5^{\circ}\text{C}$ . На большей части ареала сибирская лягушка с названной холодоустойчивостью может зимовать только в воде (в литературе обсуждаются и наземные убежища). Между тем для многих водоемов Сибири и Дальнего Востока зимой характерно катастрофическое падение концентрации кислорода, что приводит к массовой гибели водных животных (замору). Этот фактор считают одним из ограничивающих распространение сибирской лягушки, однако в водоемах Якутии, Магаданской и Амурской областей, где она зимует, содержание кислорода к весне падает до 0–2.1 мг/л, что ниже пороговых значений для самых толерантных к гипоксии видов лягушек. Проведенное исследование свидетельствует о возможном существовании адаптации сибирской лягушки к условиям гипоксии, которая могла играть решающую роль при освоении территории Сибири.

**Ключевые слова:** *Rana amurensis*, зимовка в воде, холодоустойчивость, гипоксия, аноксия, заморы.

Всем известны соседи, с которыми живешь чуть ли не век в одном доме, встречаешься, если не каждый день, то не намного реже, а двух слов о них сказать не можешь — столь они неприметны. Примерно та же ситуация со многими нашими братьями меньшими: массовыми, вроде бы хорошо знакомыми, а на проверку оказывается — вовсе нет. Такова большая часть амфибий, мелких рептилий, да и вообще некрупных животных. В сезон размножения многие лягушки даже излишне «заметны» из-за громкого «сольного пения» (самцы квакш, например, орут так, что рядом с ними разговаривать почти невозможно) или массовых хоров, слышных за многие сотни метров. После нереста животные разбредаются по окрестным лугам и лесам, где почти незаметны из-за скрытного образа жизни и в основном сумеречной активности. Лишь в конце лета и в начале осени может повезти увидеть кратковременные, хорошо заметные, например, при пересечении дорог, массовые переме-



**Даниил Иосифович Берман**, профессор, 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».

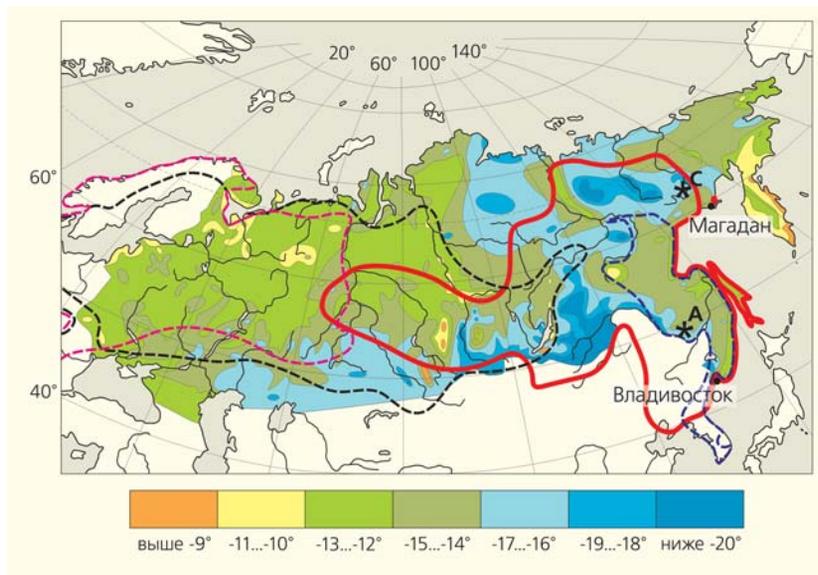


**Нина Антоновна Булахова**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник той же лаборатории и старший научный сотрудник лаборатории биоразнообразия и экологии Томского государственного университета. Область научных интересов — популяционная экология и адаптивные стратегии пойкилотермных животных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



**Ирина Васильевна Балан**, научный сотрудник государственного природного заповедника «Хинганский». Занимается изучением фауны и экологии моллюсков, а также многолетней динамикой зообентоса в водоемах заповедника.

© Берман Д.И., Булахова Н.А., Балан И.В., 2017



Области распространения бурых лягушек (травяной — розовая линия, остромордой — черная, сибирской — красная, дальневосточной — синяя) в Северной Евразии ([6] с изм.), нанесенные на схему минимальных почвенных температур на глубине 3 см [3]. Ареалы животных различаются не только размерами, но и положением. Сибирская лягушка колонизовала наиболее холодные регионы, обозначенные заливкой голубых оттенков. На севере — крайне низки температуры воздуха, на юге — несколько теплее, но мало снега. Сибирская лягушка, едва перенося  $-2.5^{\circ}\text{C}$  [9], зимует в воде, что и спасает ее от холодов. Звездочками обозначены пункты исследования зимовочных водоемов (С — пос.Сеймчан Магаданской обл. и А — пос.Архара Амурской обл.).

щения амфибий к местам зимовки, когда сотни и тысячи животных движутся в одном направлении, преодолевая иногда значительные расстояния. К концу осени они напрочь исчезают. Даже герпетологи не могут уверенно указать для многих амфибий и рептилий места зимовки [1], а потому описать условия в них: температуру, влажность (если на суше), содержание кислорода, ядовитых газов, таких как сероводород, засоление и др. (если в воде). Зато для мелких животных в сводках по экологии и в определителях зимними убежищами называют, по понятным причинам, места, в которых человек сталкивается с животными в обыденной жизни (подвалы, колодцы, основания стогов, огороды и т.п.).

Еще более частый случай: в качестве мест зимовки перечисляют все возможные варианты в воде (проточной, застойной, богатой или бедной кислородом и т.д.) или на суше (идет перечисление всех мыслимых убежищ). Такова, например, ситуация с зимовкой серой и зеленой жаб, большинства видов бурых лягушек и т.д. Нередко подобное перечисление — полуправда, поскольку отражает в основном осенние находки, но ни слова не говорит об успешности зимовки.

Особенно примечательна сибирская лягушка (*Rana amurensis*), со сведениями о местах зимовки которой тоже не все благополучно, хотя в ли-

тературе существует много упоминаний о них. Между тем обстоятельства, при которых лягушки проводят зиму, могут иметь важное общебиологическое значение.

## Ареал

Сибирская лягушка — обитатель самых холодных зимой регионов в Северном полушарии, территорий со сплошной вечной мерзлотой. По долине Индигирки *R. amurensis* распространилась до полярного круга, а по Лене и Омлою — существенно севернее (до  $70-71^{\circ}\text{с.ш.}$ ). Спорадично вид встречается на северо-востоке Азии, в долинах рек тихоокеанского бассейна (Охота, Кухтуй, Тауй, Яма) и в долине Колымы и ее притоков. Ни один другой вид бесхвостых амфибий не доходит даже до центральной части Якутии, не говоря уж о ее северных и северо-восточных районах и Магаданской обл., причем в Якутии лягушка настолько широко распространена и многочисленна, что един-

ственная из четырех видов земноводных республики не включена в Красную книгу. Воистину «самая сибирская» лягушка!

Она прекрасно чувствует себя здесь; например, в долине Лены, где средние (!) температуры января ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ , наши коллеги насчитывали у пойменных водоемов до 500 особей на километр береговой линии [2].

На юге ареал сибирской лягушки включает северо-восточные части Монголии и Китая. Юг, конечно, но с ледяными зимами... Благодаря сибирскому антициклону область низких температур в Азии зимой простирается далеко на юг, и второй полюс почвенного холода формируется в Монголии и Южной Сибири [3]. Поэтому условия зимовки животных, неглубоко зарывающихся в почву, на этих территориях мало чем отличаются от таковых на Севере.

В качестве зимовочных станций сибирской лягушки в литературе названы как стоячие и проточные водоемы, так и наземные убежища [4–6].

## Холодоустойчивость

До недавнего времени никто не исследовал криорезистентность сибирской лягушки. Однако *a priori*, исходя из благоденствия в суровых краях, труд-

но было не считать этот вид одним из самых (если не самым) холодоустойчивых среди бесхвостых амфибий: сибирская лягушка «...обитает в районе полюса холода, где зимние температуры часто падают ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ . Хотя ее устойчивость к замерзанию не изучена, этот вид и *S. keyserlingii* [сибирский углозуб] могут быть самыми холодоустойчивыми видами земноводных» [6, с.210]. Ту же точку зрения разделяют и другие исследователи [7, 8].

Вопреки предположениям о высокой криорезистентности недавно показано, что сибирская лягушка не переносит длительного охлаждения ниже  $-2.5^{\circ}\text{C}$ . До названной температуры особи этого вида, так же как и дальневосточной (*R. dybowskii*) и травяной (*R. temporaria*) лягушек, находятся в переохлажденном состоянии, а при более низких — промерзают и погибают [9].

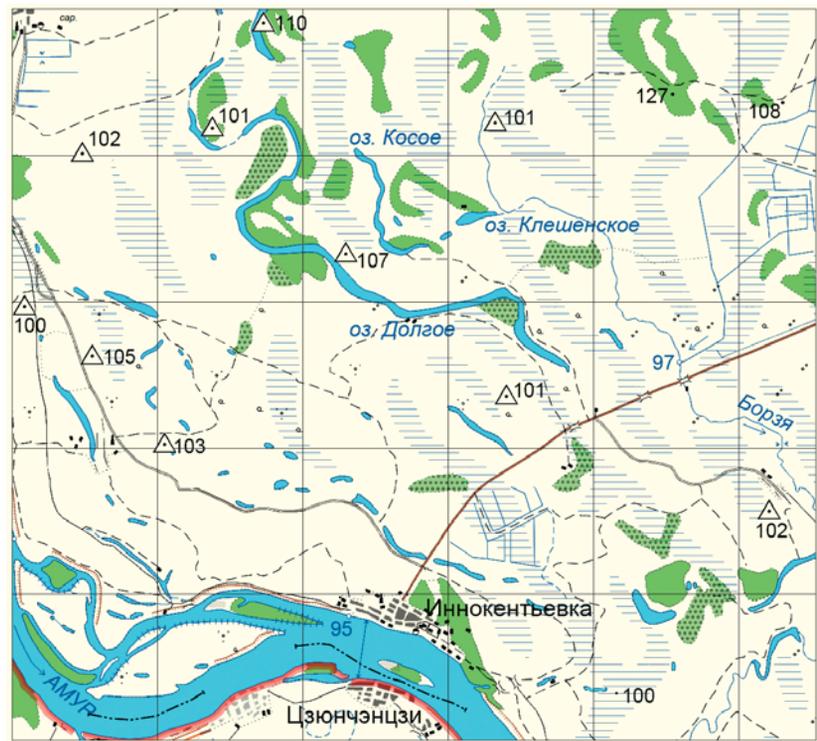
Малая холодоустойчивость лягушки и экстремальные зимние температуры на северо-востоке Азии не оставляют ей здесь иной возможности, как зимовать исключительно в воде, в отличие, например, от травяной лягушки в Европе. Но из сказанного, кроме того, безусловно, следует, что на протяжении всего ареала зимовка обсуждаемого вида на суше возможна лишь там, где минимальные температуры не опускаются ниже  $-2.5^{\circ}\text{C}$ , иными словами: во влажной обстановке под надежными укрытиями или в грунте у незамерзшей воды. Вот в сыром погребе сибирская лягушка зиму, вероятно, переживет. Какая уж тут холодоустойчивость, хотя лягушка и сибирская!

### Проточная или стоячая?

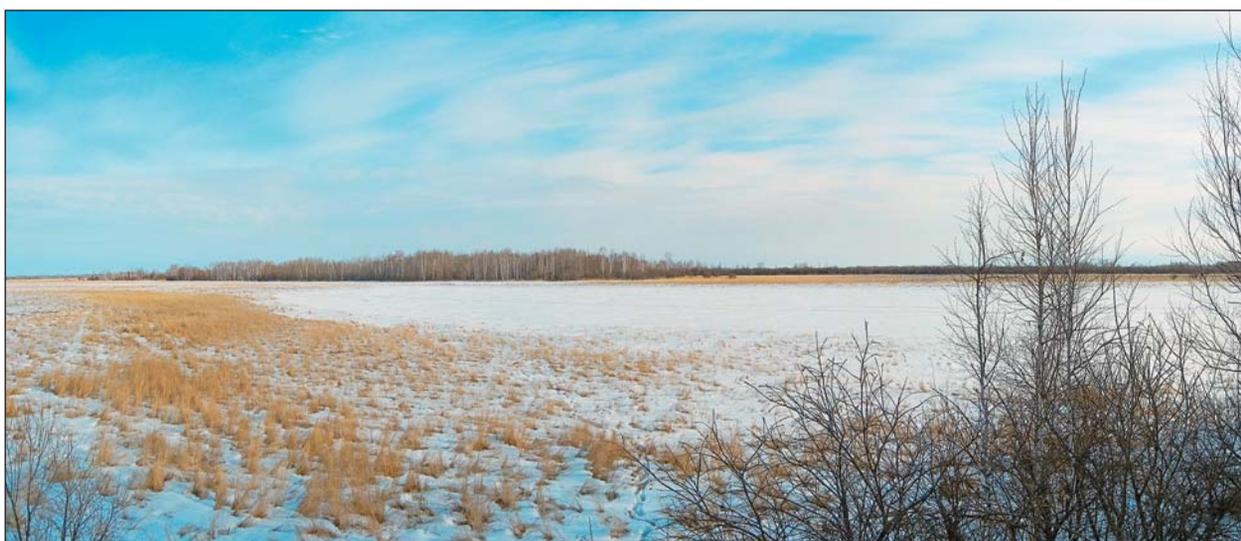
Кроме зимовки на суше для сибирской лягушки на Дальнем Востоке указывают и зимовку почти во всех возможных типах водоемов. В их числе старицы, пруды, мелкие и глубокие озера, колодцы, глубокие канавы, каналы и другие искусственные водоемы; плавни, болота, ручьи, протоки, участки рек с медленным течением [5, 6, 10]. В приведенном перечне содержится очевидное противоречие или, по крайней мере, вопрос. Многие авторы пишут о непереносимости сибирской лягушкой низкого содержания кислорода в воде [4, 5, 11]. Считается, что сокращение концентрации кислорода уже до 3–6 мг/л приводит к гибели лягушек, поэтому они успешнее зимуют в проточных водах группами из 2–3 особей, в больших же скоплениях

(до тысячи животных) — погибают [5]. Зимовка в непроточных водоемах имеет еще меньше шансов закончиться успешно даже на юге ареала не только из-за заморозов, но и из-за промерзания водоемов [5, 11]. Более того, существует устойчивое мнение, что основной фактор, лимитирующий распространение сибирской лягушки на территории Западной Сибири, — именно зимние заморы [12, 13]. Однако другие исследователи пишут о ее зимовке в болотах, которым в подавляющем большинстве случаев свойствен напряженный кислородный режим. Противоречия, вероятно, не возникло бы, если бы и те и другие описания содержали данные количественного определения концентрации кислорода в местах зимовки лягушек.

Для того чтобы решить дилемму, в конце зимы 2017 г. было измерено содержание кислорода в оз. Клешенском (юг Амурской обл.), находящемся на территории Антоновского лесничества Хинганского заповедника. Это озеро во многих отношениях замечательное. Здесь из года в год в массе зимуют сибирские лягушки; оно типично для огромной территории Архаринской низменности и террас левобережья Амура. На его берегу более 25 лет назад основана и работает летняя база станции реинтродукции редких видов птиц для подращивания «на вольном выпасе» взрослеющих птенцов японского и даурского журавлей и дальневосточного



Ландшафт Архаринской низменности — мозаика болот, лугов и перелесков из осины, берез, дуба, липы, кленов и ив на небольших возвышениях рельефа («релках»), между которыми лежат многочисленные озера. Большая часть их располагается цепочками по древним протокам рек Амур, Буряя и Архара.



Озеро Клешенское в разное время года. Здесь расположена база станции реинтродукции краснокнижных голенастых птиц. Весной в окрестностях станции в понижениях на травяных болотах, придорожных канавах нерестятся тысячи сибирских лягушек. Осенью они возвращаются в реки или озера, где и переживают зиму.

Фото Н.А.Петруниной и Н.А.Булаховой

аиста. Кроме того, в окрестностях озера ежегодно проводятся учеты численности кладок амфибий.

Архаринская низменность представляет собой уникальное сочетание болот и лугов, с кустарниками и без, перемежающихся озерами и «релками» — перелесками из дуба, липы, березы, осины и ив на небольших возвышениях рельефа. Водоемы, чаще всего, располагаются цепочками по древним руслам рек Амур, Буряя, Архары. Лягушки здесь зимуют как в многочисленных озерах, так и в реках.

Озеро Клешенское — также пойменный водоем, каплевидной формы, площадью примерно 0,2 км<sup>2</sup>, глубиной немногим более 1,5 м, слабопроточный. Почти 90% площади дна озера занимают черные илы, лишь в узкой литоральной зоне есть песчаные и глинистые участки. У берегов обильны водные

и прибрежно-водные растения. Во время паводков озеро соединяется с р.Борзя, впадающей в р.Архару.

### Парадной колонной и в рассыпную

На оз.Клешенское наше внимание обратил заместитель директора по научной работе Хинганского заповедника В.А.Кастрикин, видевший весной с наблюдательной вышки буквально колонну сибирских лягушек, вышедших из воды. Шли они полосой в 2,5–3 м, не разбредаясь, и направлялись в сторону р.Борзя, где находится марь. Лягушки скакали одна за другой, образуя сплошную движущуюся дорожку и не обращая внимания на подошедшего к ним наблюдателя. Они перемещались

короткими перебежками, сидя на одном месте от 30 с до 1.5 мин, затем прыгали дальше. Колонна почти без перерыва выходила из воды с 10–11 ч до 15 ч на протяжении двух дней. В это время на озере полоса свободной ото льда воды была около метра шириной, погода стояла ясная, но прохладная.

По свидетельству сотрудников заповедника, подобные шествия — дело рядовое, виденное многими из них. Однако специально попасть на «шествие» не так и просто, поскольку на конкретном озере оно бывает не каждую весну. Более того, пока неясно, при каких обстоятельствах будет колонна, а при каких — лягушки пойдут россыпью.

Весной 2017 г. лягушки не собирались в колонну, выходили из воды недружно. Приведем подробное, почти дневниковое описание картины, поскольку ничего подобного в отношении сибирской лягушки в литературе нет. К первым числам апреля максимальные дневные температуры уверенно перешли в плюсовую область, но ночью еще бывали заморозки (табл. 1). Снег повсюду стаял, кроме редких наиболее затененных мест, но все озеро оставалось подо льдом, без снега и верховой воды. Лишь вдоль высокого, обращенного на юг берега лед протаял узкими дырками-колодцами или небольшими (до 10 см шириной) вытянутыми проталинами; у маленького участка песчаного берега без травы появилась полоска чистой воды шириной до 30 см.

Первые лягушки вылезли из озера через образовавшуюся между берегом и льдом узкую (5–7 см) щель 3 апреля около 10 ч утра, поднялись по крутому травяному склону берега на поляну у стационара. Некоторые из них здесь грелись и затем возвращались обратно в воду под лед, другие — двигались через лес к болоту. При выходе из воды они пугливы; заметив приближающегося человека, вновь ныряли в воду. Одиночные лягушки выходили из воды до вечера. Та же картина наблюдалась и на следующий день, к концу которого полоса воды увеличилась до метра.

6 апреля похолодало, вода покрылась за ночь льдом толщиной 1–1.5 см, который за день не растаял. Такая погода сохранялась до 14 апреля, все это время лягушек не было видно. К 17 апреля потеплело, полоса воды расширилась до 10–30 м, а 18-го вечером сильным ветром лед оторвало от берега у стационара и прижало к противоположному. Лягушки не стали заметнее, но продолжали выходить из воды время от времени поодиночке. Уже 19 апреля в ближайшей луже (температура во-



Узкая протаявшая полоска между темным (поэтому нагреваемым) берегом и чистым льдом, как всегда, обладающим высокой отражающей способностью (альбедо), а потому остающимся холодным. Через эту полоску свободной воды шириной 5–7 см и начинают выходить лягушки с зимовки в озере, отправляясь в ближайшие окрестности нереститься.

Фото Н.Н.Балана



Сибирская лягушка, только что вышедшая из озера после зимовки. Пригревшись на солнце, она замерла, не обращая внимания на наблюдателя, забавно прикрыв голову разведенными и поднятыми передними лапками. Вероятно, эта поза связана с терморегуляцией — в таком же виде многие лягушки находятся на зимовке в воде (например, травяная) или на суше (остромордая и лесная) при понижении температуры до малых положительных значений (0.1–2°C).

Фото Н.Н.Балана

**Таблица 1**

**Температуры воздуха в первой половине апреля 2017 г. в окрестностях оз.Клешенского (данные метеостанции Архара)**

Дата	1.04	2.04	3.04	4.04	5.04	6.04	7.04	8.04	9.04	10.04	11.04	12.04
T <sub>мин</sub> , °C	-4.7	1.1	-3.9	6.5	0.4	1.3	-6.5	0.2	-4.7	3.5	-3.7	-7.0
T <sub>макс</sub> , °C	11.5	8.7	13.9	23	10.1	3.1	8	5.8	10.1	16.9	0.8	-0.7



Сибирскую лягушку весной перепутать с каким-либо другим видом сложно — ее выдает ярко-красная пятнистость или мелкий (красно-бело-черный) крап на нижней стороне тела и нередко на спине. В воде красный цвет выглядит более блеклым.

Здесь и далее фото Н.А.Петруниной

ды 2.2°C) были обнаружены первые кладки, в скоплениях или по отдельности; встречены спаривающиеся особи. 20 апреля озеро полностью освободилось ото льда, кладки появились во многих местах окрестностей озера. Все описываемое время осадков не было.

Такая ситуация вполне типична: сотрудники заповедника О.Б.Бессалов и В.А.Новиков в предыдущие годы тоже отмечали выход одиночных лягушек с зимовки из озер уже через небольшие дырки во льду, которые образовывались, видимо,

при нагревании солнцем занесенных сюда листьев, веток, кусочков коры и других темных предметов. Зимуют сибирские лягушки и в р.Архара, выход из первых весенних промоин которой наблюдал сотрудник заповедника С.А.Понизов; он же отмечал заметное движение лягушек к реке на зимовку [14]. Столь ранний выход весной из полностью еще покрытых льдом водоемов через закраины и проталины, видимо, вообще характерен для вида — его описал П.Д.Ларионов [4] на севере ареала в Якутии.



Залитые талой водой понижения на травяных болотах — типичное место нереста сибирских лягушек. Здесь быстро прогревается вода, значит быстро пойдет развитие икры и личинок. К середине лета болота обычно мелеют и становятся практически не заметны среди поднявшейся на кочках растительности. Незначительное количество воды между кочками может остаться, что позволяет не только закончить метаморфоз лягушкам, но и существовать здесь же, между кочками, молоди ротана, попадающей сюда во время подъема воды в реках и озерах. В отдельные годы эти крохотные водоемы пересыхают полностью и дело решается скоростью: что произойдет раньше — закончится развитие головастиков или высохнет вода.



Самцы появляются в воде несколько раньше самок и напряженно ждут их у берега, издавая негромкие, сливающиеся в «хор» звуки (а). После спаривания (б) самка откладывает в среднем до 1.5 тыс. икринок в виде одного или двух компактных комков. Кладка недолго лежит на дне, затем всплывает, икринки насыщаются водой, и комок сильно увеличивается в объеме (в). Нерест нескольких десятков пар в одном месте, когда отдельные комки икры образуют единый «мат» — дело обычное у сибирской лягушки в Амурской обл., но не на севере ареала (в Магаданская обл.), где кладки чаще расположены по-отдельности. Икру сибирской лягушки, в отличие от углозубей, не едят даже японские журавли (г). Даурские журавли брезгуют и той, и другой.



## Два отступления

Позволим себе два отступления от основной темы, характеризующие эту широко распространенную, но недостаточно хорошо известную амфибию. Брачные тока многих лягушек искать не надо — они выдают себя «хоровым пением». Сибирская лягушка считается «молчаливой», т.е. почти не подающей голоса, что не совсем верно. Конечно,



Молодые японские журавли на оз.Клешенском. Подростков со временем отлучают от прикорма и от любой другой опеки человека. Каждый год заповедник выпускает из питомника в природу 5–10 этих красавцев, часть которых возвращается на следующий год сюда же. Лягушкам во время нереста живется здесь непросто: они хорошо заметны на мелководье, но достать их могут лишь журавли, аисты и цапли, которых в окрестностях Клешенского больше, чем где бы то ни было.

нельзя сравнить брачные хоры дальневосточной и сибирской лягушек. Звонкий, неповторимый гул первых в безветренную погоду обращает на себя внимание за километры. Но и относительно тихие брачные крики сибирской лягушки, похожие на постукивание далекого лодочного мотора, отчетливо слышны не менее чем за сотню метров. Все дело в «мощности» хора. На оз.Клешенском лягушек много, а на окружающих болотах небольшие временно залитые водой понижения (10–40 см) нередко соединяются между собой и образуют обширные нерестилища, площадью до гектара, с которых доносятся их негромкие и нестройные песни.

На нересте сибирские лягушки здесь пугливы, в отличие, например, от дальневосточных, совместно с ними обитающих во многих районах Дальнего Востока. Подойдя к краю мари, нельзя сказать, есть ли на ней нерестилище сибирских лягушек. Их «песни» смолкают еще до появления человека. С дальнего края болота ветер приносит тихое «пение» сибирских лягушек, однако на ближайших к наблюдателю нескольких десятках метров их не слышно и почти не видно — они замолкают и затихают, видимо, испуганные шумом шагов. Однажды мы неподвижно и тихо просидели у мелководной западины на болоте в 15 м от нерестилища около 40 мин, но нырнувшие в воду потревоженные лягушки так и не «запели». «Песни» возобновились лишь спустя некоторое время после того, как мы скрылись за деревьями.

Возможная причина столь осторожного поведения лягушек на Клешенском — результат опыта их «общения» с журавлями и аистами, «методично» и неоднократно «проверяющими» все мелководные водоемы. Доля амфибий в питании крупных околородных птиц на Архаринской низменности велика [15, 16], и, по наблюдениям сотрудников Хинганского заповедника, весной за сутки даже молодые птицы могут съесть до 11 сибирских лягушек! У поселков, где журавлей и аистов никогда нет, сибирские лягушки в период нереста не обращали на нас внимания, снова ли по берегам водоемов в поисках самок, нырнув же, не пытались маскироваться, а спокойно лежали на дне мелководий.

### Зимой подо льдом

Клешенское озеро покрывается льдом полностью в конце октября, освобождается в конце апреля — начале мая. Толщина льда год от года разная в зависимости от обилия выпавшего снега и температуры воздуха и меняется в пределах 80–120 см. В очень холодные зимы часть озера промерзает до дна, но полностью — никогда. Меняется толщина льда и от места к месту: в марте 2017 г. она варьировала от 61 до 76 см.

Температура воды подо льдом озера, по данным измерений на шести станциях, 15 марта 2017 г. составляла 0.3–0.9°C, у дна на глубине 120–150 см была несколько выше — 1.1–3°C; содержание кислорода на глубине 1 м лишь 0.2 мг/л, у дна — 0–0.4 мг/л, тогда как 22 апреля после полного схода льда оно достигало 10 мг/л. Столь же мало кислорода (0–0.3 мг/л) при еще более низкой температуре (0.1–0.5°C) было и в проточной воде небольших (нередко площадью менее 30–50 м<sup>2</sup>) четковидных расширений — плесов р.Борзя, где также в массе зимуют лягушки. Ничтожное содержание кислорода здесь связано с тем, что река дренирует заболоченные пространства.

Таким образом, сибирские лягушки в обследованных водоемах, вопреки многократно высказанной точке зрения о непригодности подобных условий для зимовки, проводят зиму в условиях глубокой гипоксии (если не аноксии) и при малых положительных температурах. Однако зимняя гибель лягушек велика лишь в отдельные годы и касается главным образом (75–95%) ювенильных особей (табл.2). С чем связана подобная дискриминация, сказать трудно: то ли с большей

чувствительностью к гипоксии молодых особей, то ли с их отдельным от взрослых животных расположением на зимовке на чаще промерзающих участках.

Не исключено, что где-то в оз.Клешенском существуют родники, с которыми и связаны наши лягушки. Однако измерения кислорода в шести различных частях озера, в том числе и в предполагаемых местах выхода подземных вод, показали близкий «фон»: 0–0.2 мг/л.

Нельзя не упомянуть, что вместе с лягушками зимуют рыбы: известные своей терпимостью к низкому содержанию кислорода в воде карась, ротан, голяны, вьюны, щиповки, горчаки. Заходящие в высокую воду оксифильные косатка, щука, сом и змееголов, как правило, «скатываются» при падении уровня воды в реки, не успевшие — погибают. Зимняя гибель рыб (от незначительной до катастрофической, когда берега усеяны мертвой рыбой) происходит почти каждый год даже среди устойчивых к гипоксии видов и даже при небольшой толщине льда. Вместе с рыбами гибнут и лягушки, всплывающие со дна при оттаивании льда у берегов. Однако, по оценкам сотрудников заповедника, лягушек гибнет в целом меньше, чем рыбы. Причина этого неясна: либо лягушек в озере зимует меньше, чем рыбы, либо они способны выдерживать более низкое содержание кислорода. Весной 2017 г. в оз.Клешенском и р.Борзе массовой гибели не было — считанное число лягушек и не успевших уйти в протоку мелких (10–20 см) сомов оказались вмёрзшими в лед недалеко от берегов.

Водоем с массой погибших лягушек (в основном — молодых) был обнаружен нами в апреле на окраине пос.Архара. Из года в год лягушки зимуют в небольшом (примерно 200 м<sup>2</sup> площадью и около 1.5 м глубиной) прудике — единственном в системе уже зарастающих неглубоких каналов для осушения территории около 20 га. Животные здесь гибнут, видимо, если не ежегодно, то нередко: много дохлых лягушек мы видели и весной 2014 г. Вместе с ними зимовали самые устойчивые к дефициту кислорода в регионе рыбы: ротан (*Perccottus glenii*), маньчжурский озерный голяян (*Pboxinus percnurus mantschuricus*) и вьюн Никольского (*Misgurnus nikolsky*), но и они погибли в значительном количестве. Однозначно назвать причину смерти животных (недостаток кислорода или промерзание водоема) трудно, однако часть сибирских лягушек даже в этих экстремальных условиях в водоеме выжила — их кладки мы встретили в каналах вблизи пруда.

О еще более удивительном примере живучести сибирской лягушки сообщил сотрудник заповедника О.Б.Бессалов. В системе соединенных не-

**Таблица 2**

**Число погибших сибирских лягушек после зимовки (на 500–700 м береговой линии верховьев р.Борзя, Хинганский заповедник, Антоновское лесничество, близ кордона «Цаплинский») [14]**

Год	Дата	Погибших, шт.	Состав, %		
			молодь	самцы	самки
1991	23.04	54	81.5	13	5.5
1992	21–23.04	2254	95.1	2.5	2.4
1993	21–29.04	11	—	—	—
1994	3–4.05	76	56.6	17.1	26.3
1995	21.04	31	54.8	19.4	25.8
1996	23.04	260	75	13.8	11.2
1997	16.04	7	—	—	—
1998	23.04	5	—	—	—

большой протокой озерков в окрестностях Архара зимой иногда вода уходит, и между льдом и илом на дне остается столь широкое пространство, что через проломы может пролезть человек. Ил покрывается нетолстой замерзшей коркой, разломив которую мальчишки ищут в густой грязи вьюнов, натываясь на многочисленных находящихся тут же живых лягушек. Как долго смогли бы выжить лягушки в таких условиях (без кислорода), неизвестно, но эта ситуация перекликается с описанной в Якутии, где зимующих лягушек находили в иле на дне промерзших озер [2].

## На Севере

В пользу способности переносить гипоксические условия говорят и другие обстоятельства, в частности обстоятельства зимовки этой лягушки на Севере. Экология сибирской лягушки в Якутии изучена многими исследователями и обобщена Т.Н.Соломоновой с соавторами [2]. Повторим, что значительная часть ареала лежит в области вечной мерзлоты. Очень важно для понимания экологии этого вида, что примерно до 68° с.ш. лягушки обитают не только по долинам рек (где они могут уйти на зимовку в проточную, обогащенную кислородом воду), но и по озерным (аласным) равнинам; севернее же распространение носит отчетливый ленточный характер вдоль рек [17].

Аласные равнины — это территории в области вечной мерзлоты с огромным количеством в основном непроточных озер, образовавшихся при таянии отложений плейстоценового возраста с высоким содержанием льда. Разрушение их берегов приводит к спуску воды в речную сеть или в соседние озера, к объединению или формированию новых [18].

Аласные озера, в которых сибирская лягушка зимует, различаются по размеру (от десятков метров до километра и более в поперечнике). Они, как правило, мелководны (0.5–3 м), с большим количеством растворенной и находящейся в виде тонкой

**Таблица 3**

**Содержание кислорода в воде и сопутствующие характеристики термокарстового озера и залитого придорожного карьера в окр. пос. Сеймчан, в которых зимуют сибирские лягушки. 16 марта 2015 г.**

Озеро, карьер (названия местные)	Снег на льду, см	Лед, см	Вода подо льдом, см	Т, °С	Кислород, мг/л	Цвет воды
оз. Круглое	50	80	150	2.1	0.2–0.6*	бурая
карьер «Подкова»**	65	75	115	2–2.5	2.1	не окрашена

\* Одно число — совпадающие данные измерения в трех точках озера, два числа — диапазон.

\*\* В затопленном карьере слой органики на дне невелик, и поэтому содержание кислорода, возможно, не столь мало.

взвеси и иловых отложений органики. Для подобных водоемов, как и для старичных озер, зимой и весной до разрушения льда характерно крайне низкое содержание кислорода — ниже 1 мг/л, что составляет менее 7% от максимально возможного насыщения при наблюдающихся тут зимой температурах воды в 1–3°C, а нередко — он полностью исчезает [19, 20]. Кислород в воде подо льдом расходуется на окисление органики и дыхание в темноте водных растений. Такая же ситуация наблюдается и в непроточных водоемах на северо-востоке ареала лягушки — в Магаданской обл. (табл.3). В аласных озерах на севере ареала и в исследованных нами в окрестностях пос.Сеймчан Магаданской обл., кроме карася (*Carassius carassius*) и озерного голяна (*Pb. percnurus*), известных своей способностью переносить гипоксию [21], рыбы нет, но сибирская лягушка в Якутии — обычный их обитатель [4]. К большому сожалению, ничего не известно о том, зимует ли сибирская лягушка в озерах на хасырях (так называют аласы на севере Западной Сибири). Быть может, на этом пути удастся выяснить причины отсутствия нашего вида на северо-востоке Западной Сибири [22].

\* \* \*

Сибирская лягушка, что на Севере, что на Амуре проводит на зимовке около полугода: с октября по апрель. Как быстро после ледостава условия становятся гипоксическими, предстоит выяснить.

Причиной массовой гибели сибирской лягушки на зимовке, скорее всего, служит не столько гипоксия, которую, мы полагаем, большинство взрослых особей с успехом выдерживают, сколько частичное или полное промерзание водоема. Более высокую чувствительность к гипоксии молодых животных допустить нетрудно. Однако для проверки обоих предположений необходима постановка прямых экспериментов.

Интрига усиливается тем, что другие виды лягушек переносят лишь кратковременное пребывание в условиях недостатка кислорода. Рекордсменами среди них называют способных длительно существовать при 2.6 мг/л кислорода травяную (*R.temporaria*) и леопардовую (*R.pipiens*) лягушек, а также головастика горной желтоногой лягушки (*R.muscosa*), выживающих в воде с 0.6–1.2 мг/л растворенного кислорода [23, 24]. Однако дальнейшее понижение его концентрации оказывается смертельным даже для названных видов. Способность длительно существовать в глубокой гипоксии и, тем более — аноксии (что более соответствует описанной ситуации) для представителей класса Amphibia до настоящего времени не была известна [25]. Наблюдения на зимовочных водоемах сибирской лягушки в Якутии, на Северо-востоке и в Амурской обл. не оставляют сомнений, что этот вид обладает удивительной среди лягушек способностью — переносить крайне низкое содержание, точнее — почти полное отсутствие кислорода в воде. ■

Авторы признательны В.А.Кастрикину, обратившему наше внимание на оз.Клешиинское, Н.Н.Балану за помощь при проведении полевых работ, Н.А.Петруниной — за предоставленные фотографии, В.Н.Бурику — за определение рыб, Г.И.Атрашкевичу — за сообщение о зимовке лягушек в оз.Круглое (пос.Сеймчан Магаданской обл.).

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-04-00082).**

## Литература / References

1. Берман Д.И., Булахова Н.А., Алфимов А.В., Мещерякова Е.Н. Живородящая ящерица зимой в Сибири. Природа. 2016; 10: 16–29. [Berman D.I., Bulakhova N.A., Alfimov A.V., Meshcheryakova E.N. Viviparous lizard in winter in Siberia. Priroda. 2016; 10: 16–29. (In Russ., abstr. in Engl.)]
2. Соломонова Т.Н., Седалищев В.Т., Однокурцев В.А. Сибирская лягушка (*Rana amurensis* Bulenger, 1886) в Якутии. Сибирский экологический журнал. 2011; 1: 93–98. [Solomonova T.N., Sedalishchev V.T., Odnokurtsev V.A. Siberian tree frog (*Rana amurensis* Bulenger, 1886) in Yakutia. Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal. 2011; 1: 93–98. (In Russ., abstr. in Engl.)]

3. Алфимов А.В., Берман Д.И. Два полюса холода под снежным покровом Евразии. Природа. 2006; 6: 27–33. [Alfimov A.V., Berman D.I. Two poles of cold under the snow cover in Eurasia. Priroda. 2006; 6: 27–33. (In Russ., abstr. in Engl.)]
4. Ларионов П.Д. Размножение сибирской лягушки (*Rana cruenta*) в окрестностях Якутска. Зоологический журнал. 1974; 53(5): 804–806. [Larionov P.D. Reproduction of *Rana cruenta* near Yakutsk. Zoologicheskyy Zhurnal. 1974; 53(5): 804–806. (In Russ., abstr. in Engl.)]
5. Флякс Н.С. Биология бесхвостых амфибий Южного Сахалина в условиях антропогенного воздействия на естественные биоценозы: дисс. ... канд. биол. наук. М., 1991. [Fljaks N.S. Biology of tailless amphibians in Southern Sakhalin under conditions of anthropogenic impact on natural biocenoses. Ph.D. (Biology) diss.]. Moscow, 1991. (In Russ.)]
6. Кузьмин С.Л. Земноводные бывшего СССР. М., 2012. [Kuzmin S.L. The Amphibians of the former URSS. Moscow, 2012. (In Russ.)]
7. Маслова И.В. Влияние климата на отдельные аспекты жизнедеятельности земноводных и пресмыкающихся. Влияние изменения климата на экосистемы бассейна реки Амур. М., 2006; 110–119. [Maslova I.V. Influence of climate changes on physiological activity of amphibians and reptiles. Climate Change Impact on Ecosystems of the Amur River Basin. Moscow, 2006; 110–119. (In Russ., abstr. in Engl.)]
8. Пузаченко Ю.Г., Кузьмин С.Л., Сандлерский Р.Б. Количественная оценка параметров ареалов (на примере представителей рода *Rana*). Журнал общей биологии. 2011; 72(5): 339–354. [Puzachenko Yu.G., Kuzmin S.L., Sandlerskiy R.B. Quantitative estimation of area parameters (with representatives of genus *Rana* as a case study). Zhurnal obshhej biologii. 2011; 72(5): 339–354. (In Russ., abstr. in Engl.)]
9. Berman D.I., Bulakhova N.A., Meshcheryakova E.N. Cold tolerance in three species of *Rana* frogs from Siberia. Borczyk B., Ogielska M., Kolenda K., Skawinski T. (eds). Abstr. 18th Ordinary General Meeting Societas Europaea Herpetologica, Wroclaw (Poland), 7–12 September 2015. Wroclaw (Poland), 2015; 107.
10. Кузьмин С.Л., Маслова И.В. Земноводные российского Дальнего Востока. М., 2005. [Kuzmin S.L., Maslova I.V. The Amphibians of the Russian Far East. Moscow, 2005. (In Russ.)]
11. Тарасов И.Г. Земноводные и пресмыкающиеся Хинганского заповедника. Материалы V Дальневосточной конференции по заповедному делу, посвященной 80-летию со дня рождения академика РАН А.В.Жирмунского (Владивосток, 12–15 октября 2001 г.). Владивосток, 2001; 276–278. [Tarasov I.G. Amphibians and reptiles of Khinganskii Nature Reserve. Proceedings of the Fifth Far Eastern Conference on the Reserve Business, dedicated to the 80th anniversary of the birth of academician of the Russian Academy of Sciences A.V.Zhirmunsky. Vladivostok, 2001; 276–278. (In Russ.)]
12. Ищенко В.Г. Сибирская лягушка. Красная книга Ямало-Ненецкого автономного округа: животные, растения, грибы. Ред. С.Н.Эктова, Д.О.Замятин. Екатеринбург, 2010; 69. [Ischenko V.G. *Rana amurensis*. Jektova S.N., Zamjatin D.O. (eds.) The Red List of the Yamal-Nenets Autonomous County: Animals, Plants, Mushrooms. Yekaterinburg, 2010; 69. (In Russ.)]
13. Ищенко В.Г. Сибирская лягушка. Красная книга Курганской области. Гл. ред. В.Н.Большаков. Курган, 2012; 95. [Ischenko V.G. *Rana amurensis*. The Red List of the Kurgan region. Kurgan, 2012; 95. (In Russ.)]
14. Летопись природы. Отчет о научно-исследовательской работе Хинганского заповедника. 1991–1998; 16–23. [Nature Records. Report on the research work of the Khingan Reserve. 1991–1998; 16–23. (In Russ.)]
15. Париллов М.П., Игнатенко С.Ю., Кастрикин В.А. Гипотеза влияния многолетних гидрологических циклов и глобального изменения климата на динамику численности японского, даурского журавлей и дальневосточного аиста в бассейне реки Амур. Влияние изменения климата на экосистемы бассейна реки Амур. М., 2006; 92–109. [Parilov M.P., Ignatenko S.Yu., Kastrikin V.A. A hypothesis of influence of long term hydrological cycles and global climate change on population dynamics of the Japanese Crane, WhiteNaped Crane, and Oriental White Stork in the Amur River Basin. Climate Change Impact on Ecosystems of the Amur River Basin. Moscow, 2006; 92–109. (In Russ., abstr. in Engl.)]
16. Дугинцов В.А. Дальневосточный аист и пути его сохранения. Благовещенск, 2008. [Dugincov V.A. The Oriental stork and ways to preserve it. Blagoveshchensk, 2008. (In Russ.)]
17. Кривошеев В.Г. О биологии сибирской лягушки (*Rana chensinensis* Davia) в Якутии. Зоологический журнал. 1966; 45(2): 308–310. [Krivosheev V.G. On the biology of the *Rana chensinensis* in Yakutia. Zoologicheskyy Zhurnal. 1966; 45(2): 308–310. (In Russ.)]
18. Harris S.A., French H.M., Heginbottom J.A. Glossary of permafrost and related ground-ice terms. National Research Council of Canada. Technical Memorandum No 142. 1988. Available at: [http://globalcryospherewatch.org/reference/glossary\\_docs/permafrost\\_and\\_ground\\_terms\\_canada.pdf](http://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/permafrost_and_ground_terms_canada.pdf)
19. Арэ Ф.Э. Тепловой режим мелких озер таежной зоны Восточной Сибири (на примере Центральной Якутии). Озера криолитозоны Сибири. Ред. Ф.Э.Арэ Новосибирск, 1974; 98–116. [Are F.E. The thermal regime of small lakes in the taiga of Eastern Siberia (on the example of Central Yakutia). Are F.E. (eds) Lakes cryolithozone of Siberia. Novosibirsk, 1974; 98–116. (In Russ.)]
20. Васильева И.И. Сезонные изменения состава синезеленых водорослей в пригородах г. Якутска. Изв. Сиб. отд. АН СССР. Сер. биол.-мед. наук. 1965; 4(1): 139–141. [Vasil'eva I.I. Seasonal changes in the composition

- of Cyanobacteria in the suburbs of Yakutsk. *Izvestija Sibirskogo otdelenija Akademii nauk SSSR. Serija biologo-medicinskih nauk.* 1965; 4(1): 139–141. (In Russ.)]
21. Nilsson G.E., Renshaw G.M.C. Hypoxic survival strategies in two fishes: extreme anoxia tolerance in the North European crucian carp and natural hypoxic preconditioning in a coral reef shark. *J. Experim. Biol.* 2004; 207(18): 3131–3139. Doi:10.1242/jeb.00979.
  22. Равкин Ю.С., Панов В.В., Варпанетов Л.Г. и др. Особенности распределения земноводных на Западно-Сибирской равнине. Вопросы экологии и охраны позвоночных животных. Киев; Львов, 1998; 2: 49–77. [Ravkin Yu.S., Panov V.A., Vartapetov L.G. et al. The features of the distribution of the Amphibians on the West Siberian Plain. Issues of ecology and protection of vertebrates. Kiev; Lviv, 1998; 2: 49–77. (In Russ.)]
  23. Bradford D.F. Winterkill, oxygen relations, and energy metabolism of a submerged Dormant amphibian, *Rana muscosa*. *Ecology.* 1983; 64(5): 1171–1183. Doi:10.2307/1937827.
  24. Tattersall G.J., Boutilier R.G. Balancing hypoxia and hypothermia in cold submerged frogs. *J. Experim. Biol.* 1997; 200(6): 1031–1038.
  25. Tattersall G.J., Utsch G.R. Physiological ecology of aquatic overwintering in ranid frogs // *Biol. Rev.* 2008; 83(2): 119–140. Doi:10.1111/j.1469-185X.2008.00035.x.

## The most Siberian frog

D.I.Berman<sup>1</sup>, N.A.Bulakhova<sup>1,2</sup>, I.V.Balan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Biological Problems of the North, Far Eastern Branch of RAS (Magadan, Russia)

<sup>2</sup> Tomsk State University (Tomsk, Russia)

<sup>3</sup> State natural reserve «Kbinganskiy» (Arkbara village, Amur region, Russia)

Siberian wood frog (*Rana amurensis*) is the northernmost species of anuran amphibians in Asia. What are the adaptations allowing it to live in the coldest regions of Siberia and the Far East? First, it was considered that the Siberian wood frog is one of the most cold-resistant amphibians (along with the Siberian salamander). However, this opinion turned out to be erroneous: only a part of the individuals can bear prolonged cooling to  $-2.5^{\circ}\text{C}$ . In the greater part of the territory the Siberian wood frog with known cold hardiness can hibernate only in the water (in the literature land hibernacula are also discussed). Meanwhile, for many reservoirs of Siberia and the Far East winter is characterized by a disastrous drop in the concentration of oxygen, what leads to a massive death of water animals («winterkill suffocation»). This factor is supposed to limit the expansion of the Siberian frog, but in the reservoirs of Magadan and Amur regions where it hibernates, oxygen concentration does not exceed  $0.2\text{--}2.1\text{ mg l}^{-1}$ , which is below the threshold for the most tolerant to hypoxia frog species. This study indicates the possible existence of the adaptation of the Siberian wood frog to hypoxia, which could play a critical role in the expansion to the Siberian territories.

**Key words:** *Rana amurensis*, wintering in the water, cold hardiness, hypoxia, anoxia, winterkill suffocations.



### Поздравляем профессора Д.И.Бермана с юбилеем!

В сентябре Даниилу Иосифовичу исполнится 80 лет, а он по-прежнему активно работает: совмещает экспериментальные лабораторные исследования с экспедиционными, причем весьма обширными — от юга Дальнего Востока до заполярья Якутии и Чукотки (на фото профессор «знойным» чукотским летом). Разнообразен и круг его научных интересов: от палеогеографии Берингии до адаптаций пойкилотермных организмов к экстремальным условиям Севера и филогеографии животных различных систематических групп. Специалистам хорошо известны научные статьи Бермана, а читателям «Природы» — их популярные изложения. Однако для нас он — не просто автор и член редколлегии, но и надежный эксперт, переживающий за качество и судьбу журнала.

Желаем Даниилу Иосифовичу новых открытий, сил и здоровья для их совершения.

# Тектоника плит: что дальше?

Е.Г.Мирлин

Государственный геологический музей имени В.И.Вернадского РАН (г.Москва, Россия)

Более четверти века тому назад отечественные ученые М.А.Садовский, В.И.Кейлис-Борок и их соавторы в период революционных преобразований в геологии, обусловленных тектоникой плит, пришли к выводу, что представление о литосфере как механической системе — это лишь первое приближение. Фактически она обладает свойствами, присущими нелинейным природным системам. В настоящее время накоплено огромное количество фактических данных, подтверждающих эту точку зрения. Рассмотрены и систематизированы основные группы данных; показано, что литосфере свойственны: неоднородность во всех наблюдаемых пространственных масштабах, развитие процессов самоорганизации, возникновение фрактальных, масштабно-инвариантных структур, энергетическая активность, чрезвычайно высокая чувствительность к внешним воздействиям и нестабильность, текучесть и, как следствие, вихревые движения, возникновение вихревых структур. Основываясь на фактах о литосфере как нелинейной системе, делается вывод о том, что в концептуальной основе тектоники должны произойти принципиальные изменения: от механики, которая лежит в основе плитотектонической парадигмы, к неравновесной термодинамике. Формулируются первоочередные задачи, которые предстоит решить, используя данную концепцию и которые невозможно решить в рамках чисто механических представлений. К ним относятся: выявление природы разнообразных внутриплитных явлений, а также разномасштабных вихревых движений, разработка минерагенической парадигмы на новой основе, разработка методологии тектонического анализа на основе концепции литосферы как нелинейной системы. С учетом той роли, которую играли в геологическом прошлом и играют в настоящее время движения вихревого типа в формировании облика литосферы, делается предположение, что будущая тектоническая парадигма будет иметь название «вихревая тектоника».

**Ключевые слова:** тектоника плит, нелинейная система, вихревое движение.

Шестидесятые—семидесятые годы прошлого столетия — период, когда в геологию буквально ворвалась тектоника литосферных плит, породив в ней революционные преобразования. Последующие за этим десятилетия ознаменовались выдающимися результатами во всех разделах геологической науки. Большая их часть была получена благодаря использованию новых подходов и методов при анализе и интерпретации фактических данных.

Но уже во времена упоения новыми идеями у некоторых геологов (в том числе и у меня) иногда появлялась мысль такого рода: «Да, тектоника плит — революция. Но любая революция (и в обществе, и в науке) заканчивается, и возникает естественный вопрос: что дальше?». И вопрос этот возникал не в последнюю очередь в связи с отечественными публикациями, относящимися к периоду триумфального шествия тектоники плит, но, увы, невостребованными на фоне почти всеобщего увлечения новой концепцией. Речь идет о работах выдающихся отечественных ученых-геофизиков М.А.Садовского и В.И.Кейлиса-Борока [1, 2],



**Евгений Гилельевич Мирлин**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Государственного геологического музея имени В.И.Вернадского РАН. Область научных интересов — морская геология и геофизика, геодинамика. Постоянный автор «Природы».

а также их соавторов. Они свойства литосферы рассматривали совершенно иначе, нежели авторы плитотектонической концепции.

## Иерархическая неоднородность литосферы

Создатели тектоники плит — американские, английские, французские геофизики — для объяснения своей теории неоднократно прибегали к образному сравнению ее с ледоходом на реке. Течение воды — конвективные потоки в мантии, льдины — плиты и блоки литосферы. Как и льдины, плиты и блоки, увлекаемые мантийными течениями, трескаются, расходятся, сталкиваются, гро-

моздаются друг на друга. Так возникают основные структуры земной коры. В данной модели литосфера предстает как чисто механическая система. Свидетельством справедливости такого подхода служит тот факт, что плитотектоническая парадигма вполне успешно (по крайней мере в первом приближении) объяснила суть основных процессов в верхней, твердой, оболочке Земли и природу глобальных структур литосферы.

Но картина не выглядит столь однозначной и простой, если заглянуть внутрь самой литосферы, рассмотреть, как она устроена, и увидеть происходящие в ней процессы, так сказать, изнутри. Садовский, Кейлис-Борок и их соавторы, наблюдая распространение сейсмических волн в горных породах, обратили внимание на то, что устоявшийся взгляд на однородность и сплошность последних — не более чем результат осреднения характеристик. На самом деле основное свойство внутреннего строения горных пород и, соответственно, земной коры и литосферы в целом — разноранговая иерархическая неоднородность. Относительно крупные отдельности представляют собой неоднородности меньшего размера, как бы вложенные одна в другую. Система масштабно-инвариантных неоднородностей отчетливо видна в вертикальном разрезе литосферы (рис.1). При этом наблюдаются элементы самоподобия в величине отдельностей — от микрозерен минералов до крупных блоков. Самое главное следствие подобной иерархически неоднородной структуры состоит в том, что природная среда литосферы (назовем ее геосредой) приобретает свойства, присущие нелинейным природным системам. Такие системы насыщены энергией. Они чувствительны к внешним воздействиям. В них происходят процессы самоорганизации и возникают высокоорганизованные структуры самоподобия с масштабно-инвариантной геометрией, которые

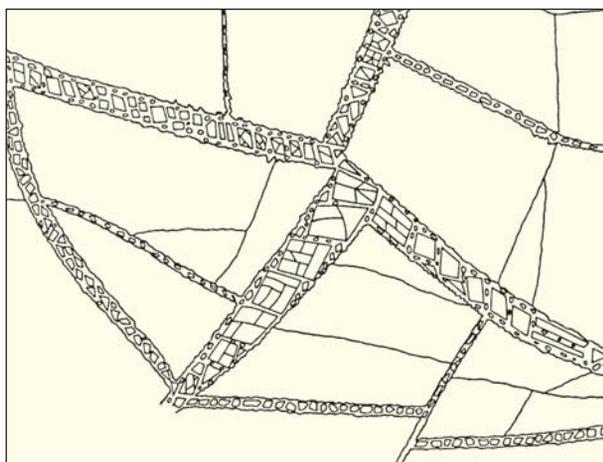


Рис.1. Внутреннее строение литосферы в вертикальном разрезе: масштабно-инвариантная иерархия неоднородностей, вложенных одна в другую [2].

называют диссипативными или фрактальными (диссипация — рассеяние, фрактал — дробный).

Предлагалось и качественное объяснение этому феномену. Земля в целом (как и ее оболочки, включая литосферу) представляет собой открытую многокомпонентную систему, которая воспринимает и перерабатывает (транспортирует и трансформирует) поступающую в нее извне энергию. Внешними источниками энергии могут быть и Солнце, и поле тяготения, и геотермическое поле, и тектонические движения, и другие источники, которые практически не изменяются в течение длительного времени. Энергия, поступающая в открытые системы, перерабатывается, причем сам механизм переработки может быть различным: механические движения, полиморфные и фазовые преобразования и др. Наиболее убедительно этот процесс выглядит применительно к поступлению в систему механической энергии. Поглощая ее, некоторые блоки теряют устойчивость и излучают энергию в виде упругих волн, которые, в свою очередь, поглощаются соседними блоками, близкими по размерам. В процессе эволюции системы изменяется конфигурация составляющих ее блоков, происходит их перегруппировка и формируются структуры, которые оптимальным образом приспособлены для диссипации поступающей в систему энергии, т.е. возникают диссипативные структуры. Получая энергию извне и перерабатывая ее, природная среда литосферы становится нестабильной, реагирующей на различные воздействия. В результате может происходить и структурообразование, и формирование магматических очагов разного ранга. Другими словами, в отличие от тектоники плит, которая связывает внутриплитные процессы (в частности, внутриплитный магматизм) исключительно с подлитосферными источниками, концепция нелинейной геосреды предполагает способность самой литосферы порождать разноранговые структуры и очаги магмы. Более того, поскольку горные породы всегда колеблются в широком диапазоне частот, иерархически неоднородная среда литосферы приобретает свойство текучести.

### Литосфера — система нелинейная

Сейчас, по прошествии более чем полувека с начала революции в геологии, накопилось огромное количество новых фактических данных о свойствах природной среды литосферы. Их совокупный анализ с несомненностью подтвердил точку зрения о ней как о системе нелинейной, поскольку ей присущи свойства, типичные для природных систем такого типа [3–11]. Основываясь на полученных результатах, остановимся кратко на каждом из этих свойств.

**Разноранговая неоднородность во всех наблюдаемых пространственных масштабах.**

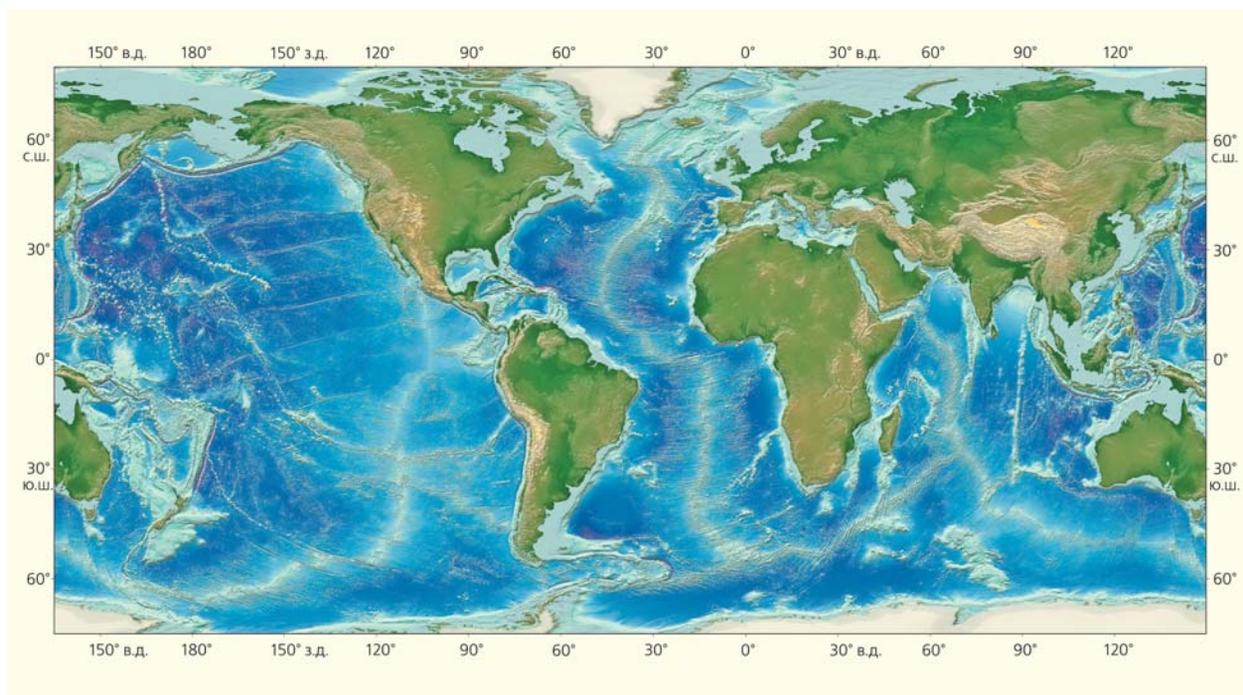


Рис.2. Рельеф земной поверхности по данным спутниковой альтиметрии. Глобальная особенность системы срединно-океанских хребтов и зон спрединга на их гребнях — разделение на отдельные сегменты вдоль трансформных разломов. Благодаря этому земная кора СОХ характеризуется разноранговой неоднородностью.

Микрозерна горных пород и минералов отчетливо видны под микроскопом. Неоднородности литосферы разного ранга выявляются на основе геофизических наблюдений, в том числе спутниковых. Они позволяют выяснить общую характеристику ее строения и на глобальном, и на региональном уровне. Так, на картах рельефа земной поверхности, построенных по данным спутниковой альтиметрии, наблюдается феномен глобального масштаба: разделение на отдельные сегменты срединно-океанских хребтов (СОХ) и зон спрединга на их гребнях (рис.2). По мере повышения детальности исследований различаются все более мелкие сегменты, которые как бы вложены в более крупные. В зависимости от величины и типа смещения зон спрединга выделяются сегменты пяти-шести и более порядков. Границами наиболее крупных сегментов служат трансформные разломы протяженностью от многих сотен до тысяч километров. Относительно малые сегменты ограничены смещениями оси нетрансформного типа. Сегменты разного порядка отражают иерархическую неоднородность внутренней структуры вновь образованной океанской литосферы, что подтверждается петрохимическими, сейсмическими и другими геофизическими методами.

Более древняя литосфера также характеризуется иерархической неоднородностью. Хороший пример — разноранговые плотностные неоднородности земной коры восточной части Средиземноморья, которые отражаются в гравитационных аномалиях (рис.3), также измеренных с помощью спутника. С целью исключения длинноволновой составляющей гравитационного поля его сглаживали с «окном» 200×200 км [9]. Для большей наглядности в выделении плотностных неоднородностей, кроме карты гравитационного

земноморья, которые отражаются в гравитационных аномалиях (рис.3), также измеренных с помощью спутника. С целью исключения длинноволновой составляющей гравитационного поля его сглаживали с «окном» 200×200 км [9]. Для большей наглядности в выделении плотностных неоднородностей, кроме карты гравитационного

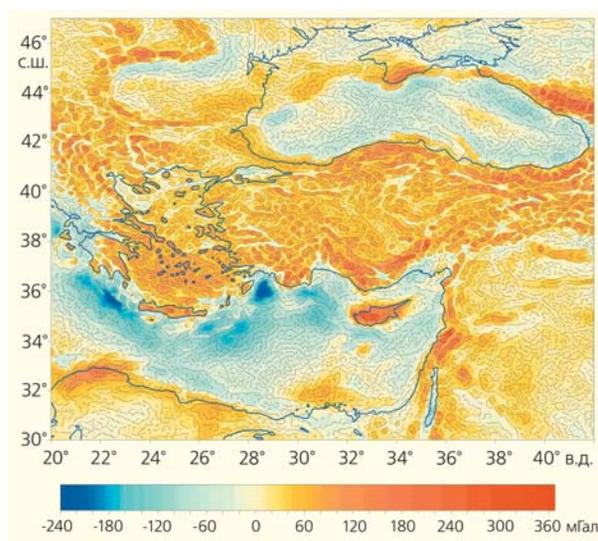


Рис.3. Гравитационное поле Восточного Средиземноморья отражает иерархическую неоднородность земной коры региона: аномалия поля силы тяжести в редукции Фая Дур [9].

поля в редукции Фая  $\Delta g_f$  (см. рис.3), были построены карты положительных и отрицательных аномалий поля силы тяжести. В совокупности эти карты демонстрируют присутствие разнопорядковых плотностных неоднородностей как в континентальной, так и в океанской части региона.

Еще один пример иерархических неоднородностей строения относится к континентальной литосфере Центральной Азии. Изучение сети разломов и сейсмичности позволяет выявить многочисленные зоны, которые состоят из определенного количества блоков, ограниченных сейсмоактивными разломами. Векторы горизонтальных смещений отдельных блоков при этом зачастую не совпадают с векторами главных плит литосферы и изменяются в соответствии со степенью жесткости блоков. В пределах Евразии наиболее активные по выделению сейсмической энергии — относительно небольшие по ширине межблоковые пространства, ограничивающие крупные блоки: Амурский, Бейшань, Памир, Тянь-Шань, район северных границ Индийской плиты. Уровни перемещения блоков находятся либо в основании земной коры, либо в мантийном слое [3]. В целом изучение внутренних неоднородностей литосферы разными методами приводит к заключению, что деление на крупные плиты — лишь самое первое приближение в иерархии ее структур.

**Развитие процессов самоорганизации, возникновение фрактальных масштабно-инвариантных структур.** Фракталам в геологии посвящена огромная литература, причем элементы самоподобия отмечаются в строении самых различных геологических провинций и на разных стадиях формирования литосферы. Раскол континентальной литосферы, предшествующий образованию океанского бассейна, начинается, как правило, с формирования структуры типа пулл-апарт (раздвиг со сдвигом). Типичный пример — Мраморное море. Его возникновение генетически связано с локальным косым раздвигом, обусловленным расщеплением на две ветви Северо-Анатолийского разлома. Вдоль последнего про-

исходит сдвиговое смещение Анатолийской плиты относительно Евразийской (рис.4). Общая амплитуда раздвиг в районе Мраморного моря достигает 100 км. Земная кора там характеризуется континентальным типом. Сама морфология бассейна, имеющего форму неправильного ромба, указывает на принадлежность его к типу впадин пулл-апарт. Последовательное увеличение исследований, достигнутое благодаря использованию геофизических методов с высоким разрешением, показывает, что внутри центральной ромбовидной депрессии существуют малые депрессии со сходной формой. Они как бы вложены в основную депрессию. Други-

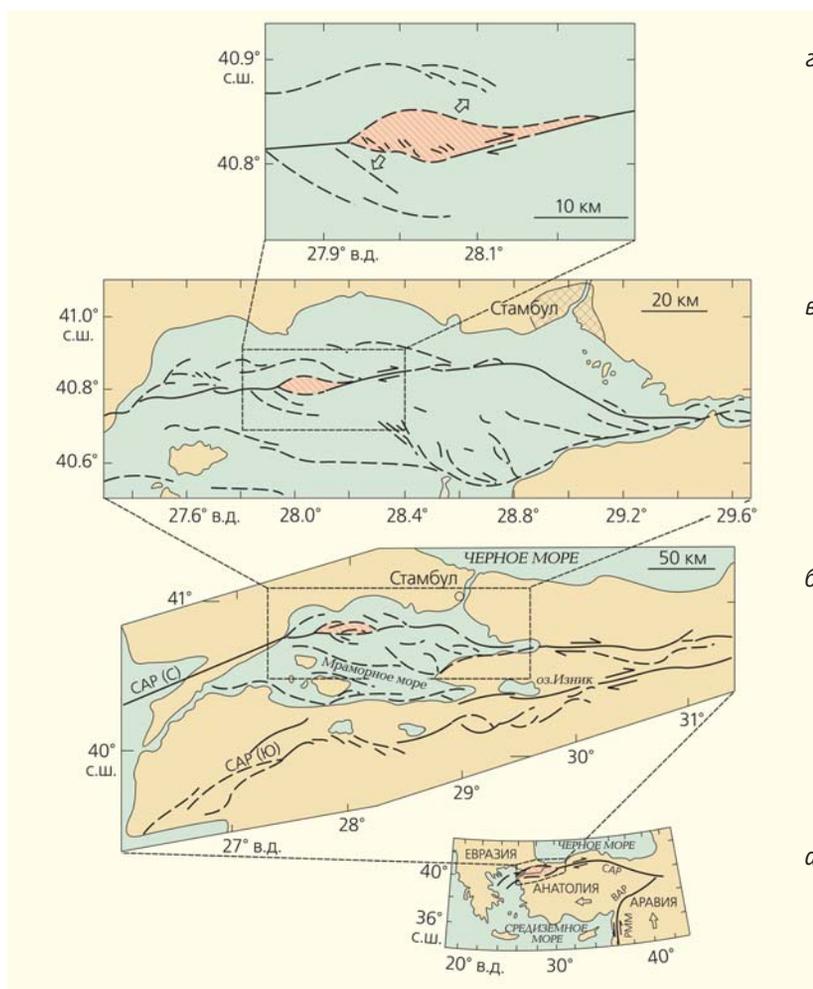


Рис.4. Масштабно-инвариантные структуры пулл-апарт Мраморного моря и его обрамления. Последовательное укрупнение масштаба: *а* — расщепление Северо-Анатолийского разлома (САР), отделяющего Анатолийскую плиту от Евразийской, РММ — разлом Мертвого моря, ВАР — Восточно-Анатолийский разлом; стрелки показывают направление движения плит и смещений вдоль разломов; *б* — впадина пулл-апарт Мраморного моря и разноранговые ромбовидные или овальные в плане структуры пулл-апарт вдоль северной (С) и южной (Ю) ветвей Северо-Анатолийского разлома, сплошные и пунктирные линии — основные и дополнительные (соответственно) тектонические нарушения, стрелки — направления смещений вдоль разломов; *в* — структуры пулл-апарт северной ветви; *г* — одна из локальных ромбовидных молодых впадин.

ми словами, наблюдается значительная инвариантность при-сдвиговых впадин типа пулл-апарт. Еще один пример масштабного самоподобия относится к совершенно иным объектам — подводным горам вулканического происхождения. Количество подводных вулканов в Мировом океане достигает многих десятков тысяч, при том что их размеры (высота, диаметр основания, объем) меняются на несколько порядков. Стало очевидным, что океанский внутриплитный магматизм сравним по масштабу со спрединговым (а возможно и превышает его). Пример вулканических построек различных размеров — Магеллановы горы в западной части Тихого океана (рис.5). Среди них встречаются и грандиозные подводные вулканы (высотой почти до 2 км), и невысокие (несколько сотен метров). Принципиально важно, что морфология почти всех открытых подводных гор практически не зависит от их масштаба, т.е. характеризуется самоподобием — все они имеют форму острровершинного конуса или конуса с усеченной вершиной.

**Энергетическая активность, чрезвычайно высокая чувствительность к внешним воздействиям — нестабильность.** Удивительным открытием отечественных исследователей, имеющим прямое отношение к этому свойству литосферы, стала находка небольших (высотой в несколько десятков метров) вулканических построек. Они обнаружены в центральной части Тихого океана, в зоне трансформных разломов Клариион-Клиппертон, где располагается российский развед-

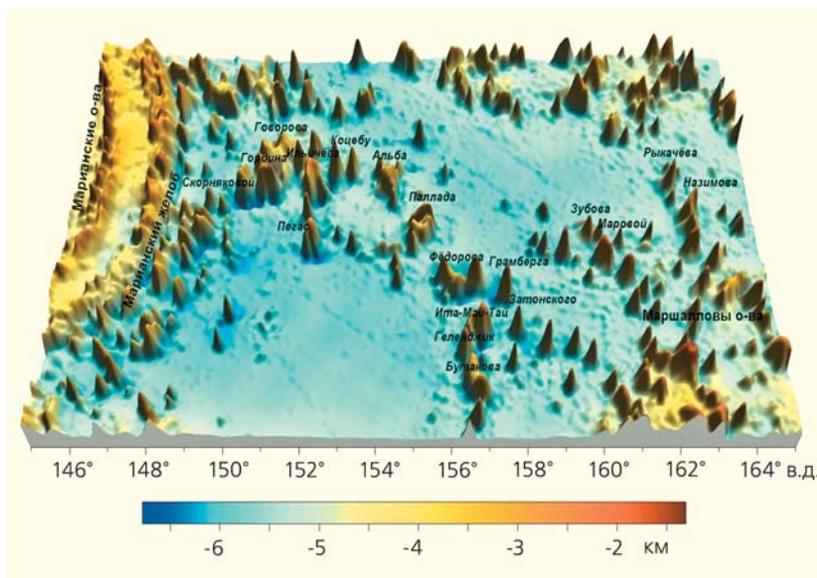


Рис.5. Магеллановы горы в западной части Тихого океана — пример масштабно-инвариантных внутрислитных вулканических построек разного ранга [9].

дочный район, в пределах которого российские специалисты ведут разведку залежей железомарганцевых конкреций. Благодаря применению самых современных технических методов изучения океанской земной коры (сонаров бокового обзора, высокочастотных профилографов, подводных аппаратов и др.) выявлены субвулканические штоки базальтов — своего рода вулканчики высотой несколько десятков метров, которые располагаются в воронкообразных углублениях в осадочном чехле (рис.6). Сами осадки при этом несут явные признаки изменений за счет гидротермальной деятельности, генетически связанной с внутриплитным вулканизмом. Возраст базальтов, по данным абсолютной датировки, составляет 12–20 млн лет, в то время как возраст литосферы — около 40 млн

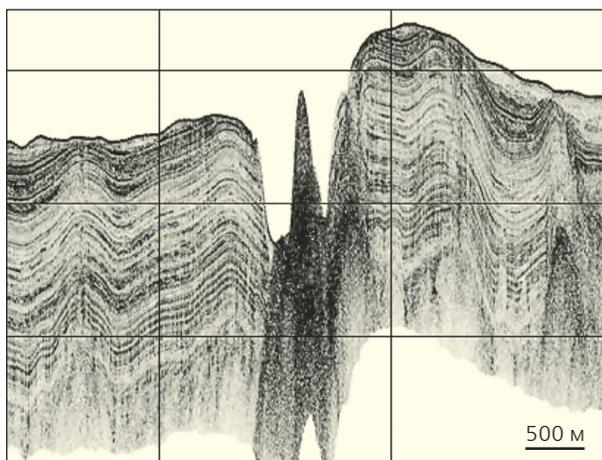


Рис.6. Субвулканический шток (слева) в воронкообразном углублении дна (справа) в пределах российского разведочного района в зоне Клариион-Клиппертон (центральная часть Тихого океана) [12].

лет. Иначе говоря, данный вулканчик образовался на уже сформированной и весьма мощной литосфере [12]. Конечно же, природу столь малых вулканических построек невозможно объяснить влиянием каких-либо подлитосферных источников. Логичнее всего связать питающий их магматический очаг с литосферой — как открытой нелинейной системой, которая способна преобразовывать поступающую в нее энергию.

С этим же свойством литосферы связано и формирование магматических очагов в зонах спрединга, где происходит новообразование океанской земной коры и где ее мощность минимальна. Сегменты с небольшим смещением оси раздвига «вложены» в более крупные сегменты, создавая их иерархическое соподчинение. Масштабно-инвариантное строение гребней СОХ проявляется и в присутствии в этих зонах разноранговых куполов. Уровень дна в центре каждого сегмента несколько приподнят относительно краевых частей. Благодаря этому продольный профиль дна океана вдоль оси спрединга состоит из куполообразных возвышенностей, причем малые купола «вложены» в более крупные. Такие купола получили название магматических. Их образование, по всей вероятности, обусловлено присутствием под дном неглубоко залегающих магматических камер. Система разноранговых магматических куполов находит чет-

кое отражение в положительных аномалиях поля силы тяжести различной интенсивности и диаметра, как это наблюдается на гребне Срединно-Атлантического хребта (рис.7). Геодинамическая обстановка в зонах спрединга достаточно сложная. В них на разных масштабных уровнях происходит быстрая смена режима — от сжатия со сдвигом к растяжению со сдвигом. Эта смена, скорее всего, и представляет собой то самое воздействие на энергонасыщенную среду, которое порождает разноранговые очаги плавления и приводит к формированию куполообразных структур и гравитационных аномалий.

**Текущее и, как результат, вихревые движения, возникновение вихревых структур.** Изучение структур кольцевого и вихревого типа в литосфере насчитывает много десятилетий. Первоначально их устанавливали исключительно на континентах. Подобные структуры довольно четко выделяются по совокупности признаков — это простирание складчатых и морфоструктурных зон, массивы горных пород определенного типа, конфигурация аномалий геофизических полей. Такие тектонические системы выделены в пределах Украинского и Балтийского щитов в фундаменте Восточно-Европейской платформы (рис.8). Благодаря систематическим исследованиям океанской земной коры показано, что в эволюции спрединговых

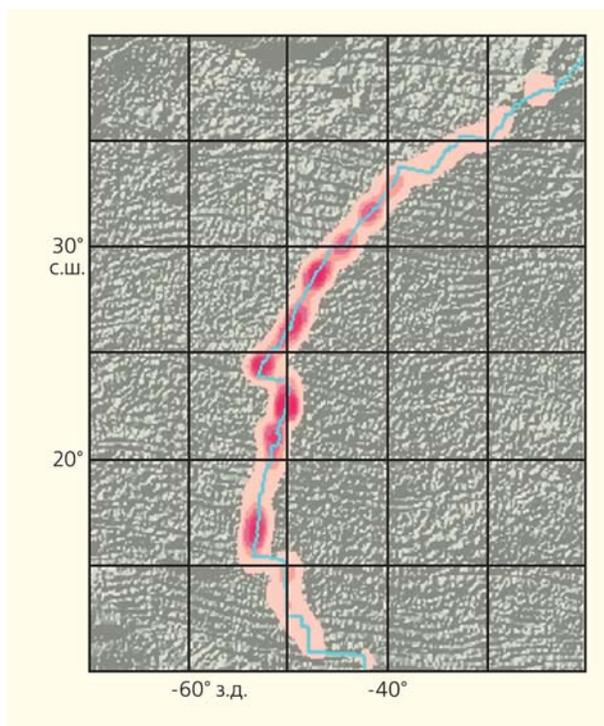


Рис.7. Положительные гравитационные аномалии разной интенсивности (оттенки розового цвета) обусловлены масштабно-инвариантными куполообразными возвышениями дна разного ранга вдоль оси спрединга (голубая линия) центральной части Срединно-Атлантического хребта.

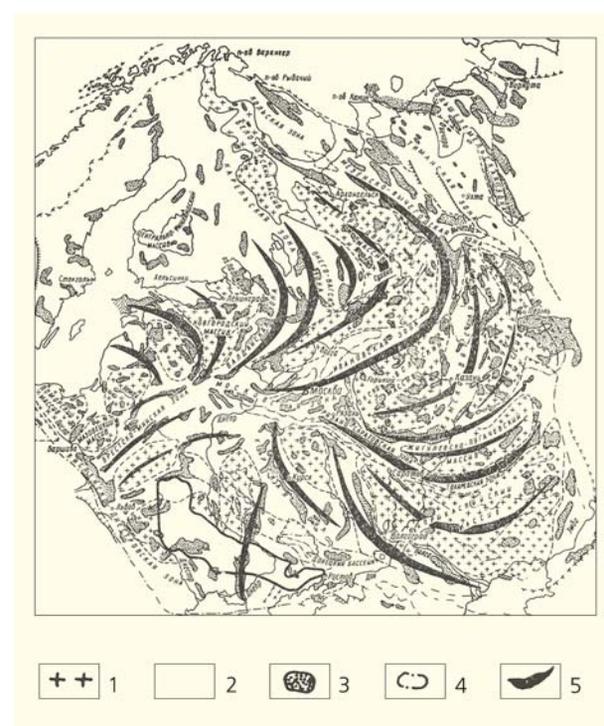


Рис.8. Вихревое расположение главнейших структур фундамента Восточно-Европейской платформы [13]. 1 — архейские массивы, 2 — протерозойские складчатые зоны, 3–4 — контуры массивов пород фундамента: 3 — намагнитенных, 4 — немагнитных; 5 — оси главнейших структур фундамента.

систем, связанных с движением плит литосферы (независимо от их размера), всегда присутствует вихревая компонента [5, 7, 11]. Проиллюстрируем этот факт двумя примерами.

Первый — вихревая спрединговая система Фиджи. Она включает в себя спрединговые блоки, расположенные в Южно- и Северо-Фиджийской котловинах (в последней, в свою очередь, выделяются два блока — северный и южный), а также в котловине Лау-Хавр. Вихревой характер эволюции всей спрединговой системы проявлен исключительно отчетливо. Раздвиг начался в Южно-Фиджийской котловине в позднем миоцене, а затем его ось стала продвигаться на север и одновременно закручиваться, что привело к расщеплению вулканической островной дуги. В результате сформировались ныне отмершая дуга (хребет Колвилл-Лау), сейчас активная вулканическая дуга, а также котловина Лау-Хавр, где спрединг продолжается до сих пор (рис.9). За период продолжительностью около 30 млн лет, прошедший с момента образования данной спрединговой системы, ось раздвиг в результате закручивания изменила свою ориентировку почти на противоположную.

Другой пример относится к котловине Вудларк, расположенной в тылу Ново-Британского глубоководного желоба (зоне сочленения Евразии с Тихим океаном). Детальная магнитная съемка в котловине выявила систему полосовых магнитных аномалий, природа которых связана со спредингом океанского дна. Их интерпретация показывает, что после раскола (около 6 млн лет назад) континентального массива островов Папуа — Новая Гвинея в северо-восточной части котловины начался спрединг. Далее его ось продвигалась сначала в юго-западном направлении, а затем постепенно изменила свое простирание на субширотное. Вследствие пропегейтинга (продвижения зоны спрединга) и закручивания оси раздвига генерализованные контуры котловины приобрели округлые очертания. В эти закругленные контуры, формирующиеся под воздействием вихревого потока, будто бы вложена изломанная, ступенчатая структура спрединговых сегментов и пассивных окраин, которые представляют собой результат обязательного присутствия компоненты сдвига внутри вихря (рис.10). С момента раскола континентального массива и начала спрединга генеральное простирание его оси изменилось почти на 90°.

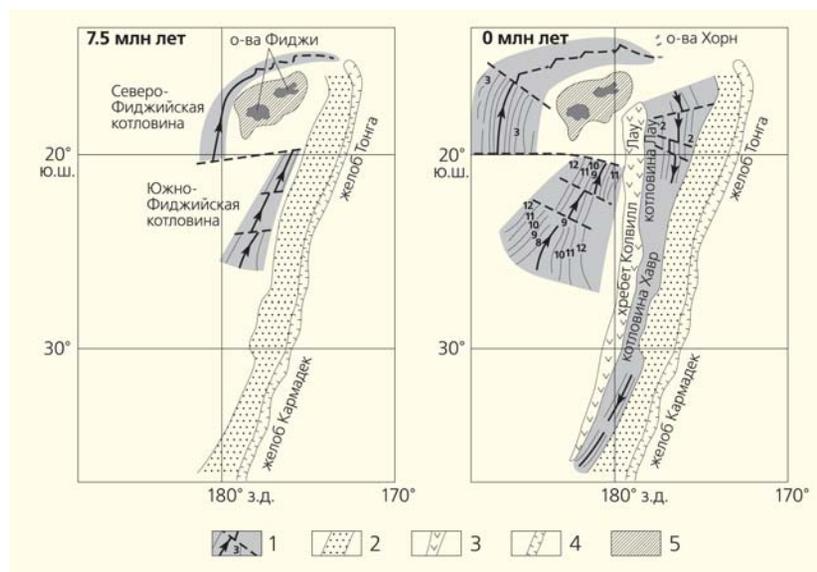


Рис.9. Этапы эволюции вихревой спрединговой системы Фиджи. 1 — оси магнитных аномалий с их номерами и трансформные разломы (показаны пунктиром), стрелки — направление пропегейтинга оси раздвиг; 2–3 — островные дуги: 2 — активная, 3 — отмершая; 4 — глубоководный желоб; 5 — массив о-вов Фиджи.

## Но что же дальше?

Основываясь на перечисленных выше фактах литосферы как нелинейной системы, обратимся к вопросу, поставленному в заголовке статьи. Ответ на него состоит из двух частей: вполне очевидной и прогностической. Первая заключается в том, что в концептуальной основе тектоники должны произойти принципиальные изменения: от механики, которая лежит в основе тектоники плит, к нелинейной термодинамике. В этом утверждении нет ничего неожиданного и сверхъестественного. Большинство открытых природных систем находятся в состоянии, далеком от термодинамического равновесия [14]. Разумеется, природная среда литосферы — не исключение. Но эти изменения обусловлены не только чисто теоретическими предпосылками. Они необходимы для дальнейшего развития тектоники и решения задач, которые невозможно решить в рамках чисто механистической плитотектонической парадигмы. Первоочередные из этих задач также представляются очевидными.

**Познание природы разнообразных внутриплитных явлений.** К ним относятся, в частности, формирование магматических образований разного ранга: от вулканчиков во внутренних частях океанских литосферных плит до гигантских платобазальтовых полей на континентах. С точки зрения концепции литосферы как нелинейной системы возможная природа разноранговых очагов внутриплитного магматизма обусловлена реакцией метастабильной среды литосферы на изменение геодинамической обстановки. Разумеется, эта гипотеза требует развития.

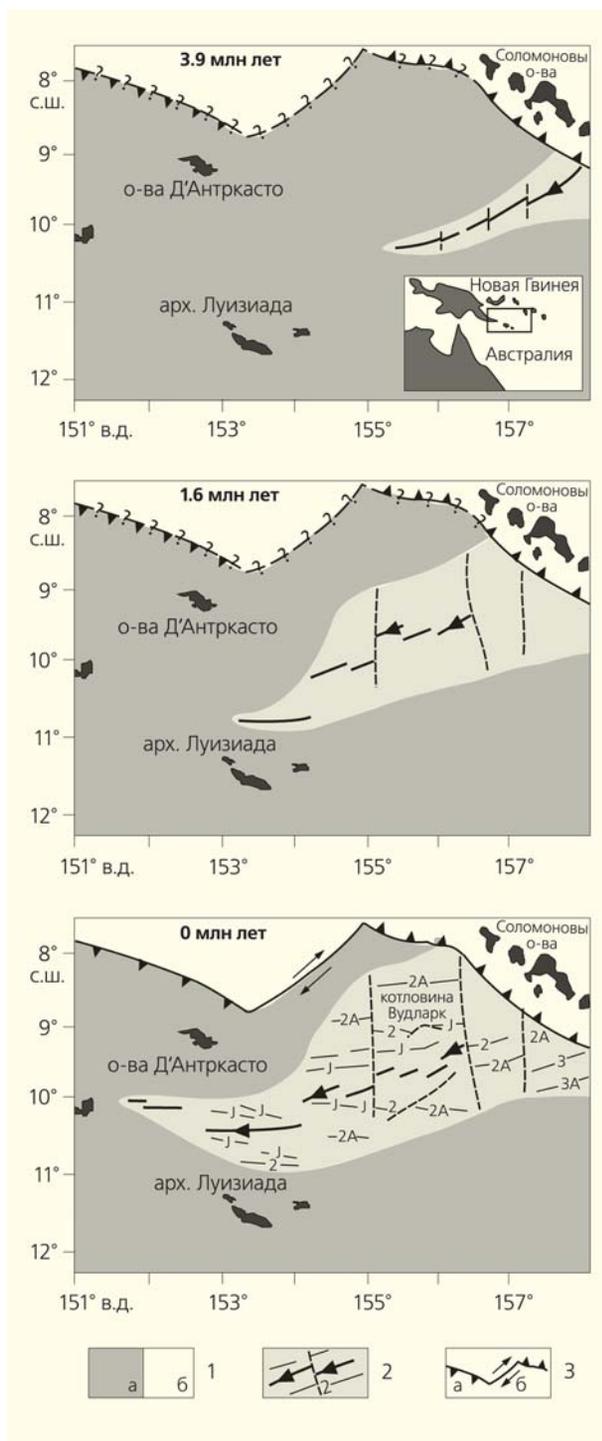


Рис.10. Принципиальная схема раскола континентального массива островов Папуа—Новая Гвинея и образования вихревой спрединговой системы котловины Вудларк. 1 — земная кора: а — континентальная, б — океанская; 2 — спрединговая система котловины Вудларк с новообразованной океанской корой: 1 — оси магнитных аномалий (тонкие линии), 2 — трансформные разломы (утолщенные линии) и направление пропегейтинга (стрелки); 3 — зоны субдукции (а) и соединяющий их разлом (б). Те же линии с вопросительным знаком — предполагаемое положение указанных границ.

**Выявление природы и кинематики вихревых движений: от вихревой компоненты в перемещениях разноранговых плит литосферы до вихревых структур внутри их континентальных частей.** Соответственно, к этой задаче примыкает изучение вихревой компоненты мантийной конвекции, ее влияния на подошву литосферы и возникновения вихреподобных структур в литосфере на разных стадиях эволюции Земли.

**Разработка минерагенической парадигмы на новой концептуальной основе.** Ныне признано, что степень изученности поверхностных геологических структур близится к пределу и, соответственно, близится к исчерпанию запасы месторождений полезных ископаемых, приуроченных к верхним горизонтам земной коры. В недалеком будущем ведущую роль станут играть месторождения, залегающие на значительных глубинах. Их обнаружение потребует разработки принципиально новых критериев глубинного прогноза и поисков различных видов минерального сырья, а этого нельзя достичь, используя прежнюю теоретическую и методологическую базу.

**Разработка методологии тектонического анализа на основе концепции литосферы как нелинейной системы.** Решение этой задачи возможно лишь на основе междисциплинарных исследований, т.е. объединенными усилиями геологов, геофизиков, геохимиков и специалистов в области нелинейной термодинамики природных систем.

Прогностическая же часть ответа на поставленный в заголовке вопрос касается названия будущей тектонической парадигмы. Не исключено, что это будет «вихревая тектоника» с учетом, во-первых, той роли, которую играли в геологическом прошлом и играют сейчас движения вихревого типа в формировании облика литосферы, и, во-вторых, роли вихревых движений в других оболочках нашей планеты — водной и воздушной. Их природные среды также относятся к типу нелинейных неравновесных систем. Но окончательный ответ на вопрос о названии новой тектонической парадигмы — за практикой.

Конечно же, все сказанное выше не означает, что за концепцией нелинейной литосферы последует разрушение стройного здания тектоники плит. По-прежнему круг задач, которые могут быть решены на ее основе, достаточно широк и, по-видимому, останется таковым и в будущем. Но необходимо отдавать себе отчет, что прорыв в новое понимание процессов в литосфере на прежней основе невозможен.

В заключение одно замечание, касающееся геологии как романтической науки. Романтика заключается в новых экспедициях не только в неведомые края, страны и океаны, но и в новые, неизученные области науки, в их освоение, приложение к науке геологической и в ее дальнейшее развитие. Для геологов настало время такого романтического поиска. В путь! ■

## Литература / References

1. *Садовский М.А.* Автомодельность геодинамических процессов. Вестник АН СССР. 1986; 56(8): 3–11. [*Sadovsky M.A.* Self-similarity in geodynamic processes. Vestnik Akademii Nauk SSSR. 1986; 56(8): 3–11. (In Russ.)]
2. *Keilis-Borok V.I.* The Lithosphere of The Earth as a non-linear system with implications for Earthquake prediction. Reviews of Geophysics. 1990; 28 (1): 19–34.
3. *Gatinsky Yu., Prokhorova T.V.* Superficial and deep structure of Central Asia as Example of continental Lithosphere Heterogeneity. Universal Journal of Geoscience. 2014; 2 (2): 43–52.
4. *Мирлин Е.Г.* От тектоники плит к фрактальной тектонике. Докл. АН. 2003; 389 (2): 71–74. [*Mirlin E.G.* Global tectonic from plates to fractals. Doklady Akademii Nauk. 2003; 389 (2): 71–74. (In Russ.)]
5. *Мирлин Е.Г.* Вихри и смерчи в твердых оболочках Земли: возможны ли они? Природа. 2006; 2: 33–42. [*Mirlin E.G.* Whirls and Vortices in Earth Crust: Are They Possible? Priroda. 2006; 2: 33–42. (In Russ.)]
6. *Мирлин Е.Г.* Геометрия помогает геологии. Природа. 2009; 9: 37–49. [*Mirlin E.G.* Geometry Helps Geology. Priroda. 2009; 9: 37–49. (In Russ.)]
7. *Мирлин Е.Г.* Вихревая тектоника. Доклады АН. 2009; 426 (5): 649–652. [*Mirlin E.G.* Doklady Earth Sciences. 2009; 427 (1): 715–718.]
8. *Mirlin E.G.* Lithosphere as a Nonlinear System: Geodynamic Consequences. Tectonics. Closson D. (ed.). InTech, 2011; 227–250. Doi:10.5772/13777.
9. *Углов Б.Д., Мирлин Е.Г.* Геодинамика Восточного Средиземноморья в свете новых данных о латеральной неоднородности литосферы. Отечественная геология. 2013; 6: 71–79. [*Uglov B.D., Mirlin E.G.* Geodynamics of the Eastern Mediterranean, in the light of new data on the lateral heterogeneity of the lithosphere. Otechestvennaya Geologiya. 2013; 6: 71–79. (In Russ., abstr. in Engl.)]
10. *Мирлин Е.Г., Миронов Ю.В.* Взаимодействие геосфер — основа жизни нашей планеты // Природа. 2013; 3: 43–49. [*Mirlin E.G., Mironov Yu.V.* Interaction of Geospheres Is the Foundation of Life of Our Planet. Priroda. 2013; 3: 43–49. (In Russ.)]
11. *Мирлин Е.Г., Оганесян Л.В.* Вихри в литосфере. М., 2015. [*Mirlin E.G., Oganesyanyan L.V.* Vortices in the Lithosphere. Moscow, 2015. (In Russ.)]
12. *Юбко В.М., Лыгина Т.И.* Внутриплитные вулканогенно-гидротермальные системы зоны Клариян-Клиппертон Тихого океана. ДАН. 2015; 462 (4): 452–455. [*Yubko V.M., Lygina T.I.* Intraplate volcanic-hydrothermal systems of the Clarion-Clipperton zone, Pacific Ocean. Doklady Earth Sciences. 2015; 462 (2): 555–558. Doi:10.1134/S1028334X15060082.]
13. *Пригожин И.* Философия неустойчивости. Вопросы философии. 1991; 6: 48–52. [*Prigogine I.R.* The Philosophy of Instability. Voprosy filosofii. 1991; 6: 48–52. (In Russ.)]

## Plate tectonic: what next?

E.G.Mirlin

Vernadsky State Geological Museum, RAS (Moscow, Russia)

More than a quarter of a century ago the russian scientists M.A.Sadovskiy, V.I.Keilis-Borok and their co-authors in the period of revolutionary changes in the geology due to plate tectonics came to the conclusion that the idea of the lithosphere as a mechanical system — this is only a first approximation. In fact, it has the characteristics inherent for the nonlinear natural systems. A huge amount of evidence accumulated at the present time to support this view. The main group of data were reviewed and systematized; it is shown that the lithosphere is characteristic: the heterogeneity in all observed spatial scales, the development of processes of self-organization, occurrence fractal, scale-invariant structures, energy activity, extremely high sensitivity to the external influences and instability, the fluidity and, as a result, vortex motion, the appearance of the vortical structures. Based on the facts about the lithosphere as a nonlinear system, it is concluded that the conceptual framework of the tectonics should occur a fundamental change: from the mechanics, which is the basis of plate tectonic paradigm to non-equilibrium thermodynamics. Formulates the priorities which should be solved on the basis of this concept and which cannot be solved within the framework of the purely mechanical idea. These include: identifying diverse nature of the intraplate phenomena and multi-scale vortex motions, the development of the mineragenic paradigm on a new basis, development of the methodology of tectonic analysis based on the concept of the lithosphere as a nonlinear system. Taking into account the role vortex type movements played in the geological past and are now playing in shaping the lithosphere, the assumption is made that the future tectonic paradigm will have the name «vortex tectonic».

**Key words:** plate tectonics, nonlinear systems, vortex motion.

# Современные водные ресурсы Восточной Сибири

Р.Г.Джамалов, Т.И.Сафронова

*Институт водных проблем РАН (г.Москва, Россия)*

В течение последних десятилетий в Восточной Сибири наблюдается существенное потепление. Оно приводит к увеличению температуры приземного воздуха и атмосферного увлажнения, росту глубины протаивания многолетнемерзлых пород и болотных массивов, изменению величин речного и подземного стока. Выполнена оценка современных ресурсов поверхностных и подземных вод Восточной Сибири и их изменений в условиях меняющегося климата. Выявлены основные факторы формирования и пространственно-временного распределения ресурсов подземных и поверхностных вод. Построены карты водных ресурсов и их минимальных месячных значений на количественной основе.

**Ключевые слова:** водные ресурсы, речной сток, подземные воды, многолетнемерзлые породы, климат.

На рубеже XX и XXI вв. среднегодовая температура поверхности Земли повысилась на 0,6°C. На территории России потепление составило в среднем 0,9°C, а в Западной и Восточной Сибири — 3,5–4,7°C. Глобальное повышение температуры приводит к изменению региональных величин испарения и количества осадков, что, в свою очередь, обуславливает среднегодовое приращение или сокращение речного и подземного стока. Следовательно, региональная и глобальная оценка изменений подземного стока как элемента водного баланса имеет конкретную физическую основу. Вместе с тем следует подчеркнуть, что прогнозные оценки изменения водных ресурсов на ближайшую и отдаленную перспективу недостаточно совершенны и содержат определенные ошибки, поэтому они должны быть вариантными и соответствовать наиболее вероятной направленности климатических изменений будущего.

Объектами наших исследований стали бассейны восточносибирских рек — Лены, Яны, Индигирки, Алазеи, Анадыри, Колымы. Данные гидрологических наблюдений на постах Росгидромета, расположенных на этих реках, позволили провести анализ изменения среднегодового и среднемеженного стока за периоды 1945–1977



**Роальд Гамидович Джамалов**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологических проблем охраны окружающей среды Института водных проблем РАН. Область научных интересов — формирование подземного стока и ресурсов подземных вод, морская гидрогеология. Лауреат премии имени Ф.П.Саваренского (2001). Заслуженный деятель науки РФ (2008).



**Татьяна Ивановна Сафронова**, ведущий инженер того же института. Научные интересы связаны с оценкой ресурсов подземных вод России и мира и их картированием.

и 1978–2013 гг. Также выполнена региональная переоценка возобновляемых ресурсов подземных вод Восточной Сибири.

## Климатические изменения

Климат Восточной Сибири в значительной мере определяется ее географическим положением внутри Азиатского материка. В его центре зимой формируется обширная область высокого давления — сибирский антициклон, мощный отрог

которого занимает всю Восточную Сибирь. В условиях антициклонального типа погоды зима отличается малой облачностью и преобладанием штилей, что приводит к сильному выхолаживанию. В связи с этим основные черты климата — ясная, суровая, малоснежная, продолжительная зима и довольно засушливое, короткое и жаркое лето.

Средние месячные температуры воздуха самого холодного месяца (января) колеблются от  $-25$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  на юге района и достигают  $-48^{\circ}\text{C}$  на севере. На полюсе холода Северного полушария — в районе Верхоянска и Оймякона — морозы достигают  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Летом температура воздуха повышается иногда до  $30^{\circ}\text{C}$  и более. Средние температуры самого теплого месяца (июля) на севере в зоне тундры составляют около  $10^{\circ}\text{C}$ , а на юге в верховьях Лены и Енисея (Минусинская котловина) превышают  $20^{\circ}\text{C}$ . Переход температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  на Крайнем Севере наблюдается в середине июня и в середине сентября, а в южных районах (Минусинская котловина) — в двадцатых числах апреля и в середине октября.

Осадков выпадает мало. На преобладающей части территории их количество не превышает 200–400 мм/год. Чрезвычайно бедна осадками Лено-Вилюйская низменность (200 мм/год). Еще меньше их выпадает на севере, в Приполярно-морской низменности, здесь годовая сумма не выше 100 мм. Так, в районе дельты Лены выпадает всего около 90 мм/год. Примерно такое же количество осадков характерно для островов арктической зоны (Новосибирских, Врангеля). Более обильны осадки в Саянах, где их годовая сумма достигает 600–700, а местами и 1200 мм. Основная часть осадков (70–80%) выпадает летом в виде дождей.

Из-за антициклонического режима погоды высота снежного покрова сравнительно невелика. В тундровой зоне и на Яно-Оймяконском нагорье она составляет 250–300 мм, увеличивается в бассейне Верхнего Алдана и верховьях Лены (500 мм и более), но снижается в Забайкалье и верховьях Витима (менее 200 мм).

В течение последних 30–40 лет (после 1976 г.) прослеживается наиболее интенсивное потепление. За период инструментальных наблюдений самыми теплыми оказались первые 15 лет нового столетия. В 1976–2015 гг. скорость роста глобальной температуры составила около  $0.17^{\circ}\text{C}/10$  лет, а на территории России — более  $0.45^{\circ}\text{C}/10$  лет. В 2016 г. положительный линейный тренд среднегодовой температуры практически не изменился, а на побережье Северного Ледовитого океана (п-ов Таймыр) превысил  $0.9^{\circ}\text{C}/10$  лет [1, 2]. Интенсивное потепление весной происходит в Средней ( $0.77^{\circ}\text{C}/10$  лет) и Восточной ( $0.72^{\circ}\text{C}/10$  лет) Сибири. Осенью в этих регионах температура повышается за 10 лет в среднем на  $0.74^{\circ}\text{C}$  [1–4].

## Морфология мерзлой зоны

Большая часть территории относится к зоне распространения сплошных многолетнемерзлых пород. В районе широтного отрезка Лены, примерно по линии  $60^{\circ}$  с.ш., сплошная мерзлота сменяется прерывистой, а далее к югу — островной. Такое распространение мерзлой зоны связано с тем, что основные ее параметры (температура у подошвы слоя годовых колебаний, мощность и прерывистость) определяются широтной и высотной поясностью, а также литологическим составом и водопроницаемостью пород [5].

В зоне сплошного развития мерзлоты мощность многолетнемерзлых пород превышает 200–400 м, а их температура обычно ниже  $-2.5^{\circ}\text{C}$ . Под незамерзающими озерами и руслами рек здесь встречаются сквозные талики, расчленяющие зону на отдельные блоки. В области прерывистого распространения мощность многолетнемерзлых пород снижается до 50 м, а температура постепенно возрастает до  $-1^{\circ}\text{C}$ . В зоне островной мерзлоты мощность мерзлых пород обычно менее 50 м при их температуре не ниже  $-1^{\circ}\text{C}$ .

В ряде мест (Лено-Вилюйская низменность, устьевые участки Колымы и Индигирки и т.д.) вблизи поверхности встречаются погребенные льды, занимающие значительные площади.

Суровый климат и многолетняя мерзлота определяют своеобразие режима природных вод Восточной Сибири. Несмотря на небольшое количество атмосферных осадков, полную непроницаемость мерзлых грунтов, малые потери на фильтрацию и испарение, поверхностный сток здесь сравнительно высок. Из-за многолетней мерзлоты реки не получают достаточного питания грунтовыми водами, поэтому здесь повсеместно распространены явления перемерзания рек и образования наледей. В этих условиях своеобразно развиваются и эрозионные процессы. Скованные мерзлотой грунты трудно поддаются размыву, следовательно, глубинная эрозия развивается слабо, а преобладает боковая, приводящая к расширению долин.

Согласно результатам современных исследований, глобальные климатические изменения сопровождаются увеличением стока сибирских рек. Поэтому в наше время особенно актуальна проблема переоценки ресурсов подземных вод и речного стока.

Мерзлота — один из важнейших природных факторов формирования водного стока Восточной Сибири. Процессы летнего оттаивания и зимнего промерзания оказывают непосредственное влияние на характер поверхностных вод. Мощность деятельного (сезонно-талого) слоя и фильтрационные свойства слагающих его пород определяют возможности инфильтрации атмосферных осадков.

Мощность деятельного слоя зависит от характера теплообмена грунтов с атмосферой и определя-

ется физико-географическими условиями местности. В целом она изменяется от 0.5 до 5.0 м, причем эти экстремальные значения порой могут отмечаться на соседних участках, что говорит о чрезвычайной изменчивости величин оттаивания грунтов по площади, особенно в горных районах [5]. Деятельный слой оказывает влияние на распределение влаги по годам, поскольку содержащаяся в нем вода осенью замерзает и поступает в гидрографическую сеть только летом следующего года. Таким образом, сезонно-талый слой в определенной мере выполняет роль регулятора речного стока, и этот тип регулирования может быть определен как сезонно-мерзлотный. Это особенно заметно в районах распространения низкотемпературных многолетнемерзлых пород, особенно в пределах речных бассейнов горных сооружений Восточной Якутии.

Данные современного мониторинга и результаты геотермических расчетов за последние 25 лет свидетельствуют о деградации криолитозоны (повышается температура многолетнемерзлых пород, уменьшается их площадь, увеличивается глубина сезонного протаивания). Рост температуры воздуха за последние 30 лет привел к тому, что над мерзлыми породами теперь образуется мощный талый слой и они постепенно отрываются от поверхности земли. Развитие такого процесса приводит к сокращению площади приповерхностной многолетней мерзлоты при сохранении на некоторой глубине многолетнемерзлых пород, характерных для данной широты.

### Гидролого-гидрогеологические условия бассейна Лены

Река Лена — главная водная артерия Восточной Сибири. Ее длина от истока до о. Столб в начале дельты составляет 4400 км, а площадь бассейна — 2490 тыс. км<sup>2</sup>. По характеру течения Лену обычно делят на три крупных участка: верхний (от истока до впадения р. Витим — 1690 км), средний (от устья Витима до впадения р. Алдан — 1400 км) и нижний (от устья Алдана до о. Столб — 1310 км). В пределах верхнего участка Лена протекает в узкой долине с крутыми или обрывистыми берегами, русло обладает значительными уклонами и изобилует перекатами. В среднем течении река становится полноводнее. В пределах нижнего участка ее долина расширяется до 25–30 км, река течет преимущественно в разветвленном русле. Наиболее узкий участок находится в районе с. Кюсюр. Дельта Лены занимает площадь 27.7 тыс. км<sup>2</sup>. Здесь река дробится на многочисленные рукава, образуя 1614 островов. Питание Лены смешанное (снеговое, дождевое и подземное).

Замерзает Лена почти повсеместно во второй половине октября, а вскрывается в верхнем течении обычно в начале мая, в нижнем — в конце мая или начале июня. В период весеннего ледохода

образуются заторы льда, вызывающие большие подъемы уровня воды.

В бассейне Лены выделяются крупные структурные единицы, определяющие характер формирования и условия движения подземных вод. Это Приверхоянский краевой прогиб — область максимального погружения фундамента (до 9000 м в Линденской впадине); Вилюйская синеклиза — относительно мобильная часть платформы, вдоль северо-западной окраины которой на 550 км протягивается зона разломов и трапповых излияний; северный склон Алданского щита, который, погружаясь в сторону Ангаро-Ленского прогиба, переходит в Березовскую впадину, где мощность нижнепалеозойских отложений превышает 3000 м; Ангаро-Ленский прогиб, разделяющийся поднятиями на отдельные впадины.

В Восточной Сибири в соответствии со структурно-гидрогеологическим районированием в сочетании с водно-балансовыми регионами крупных речных систем определены следующие артезианские бассейны: Ангаро-Ленский, Тунгусский, Якутский, Оленекский, Котуйский и Хатангский. Кроме того, выделяются Анабарский, Алданский, Патомо-Витимский и Оленекский гидрогеологические массивы [6].

Формированию ресурсов подземных вод и их взаимодействию с поверхностным стоком способствует глубина эрозионного вреза Лены и ее притоков (их дренирующее воздействие), которая в горных районах составляет 600–1000 м, а на плато и возвышенных равнинах — 150–300 м. Масштабы и направленность изменений современных ресурсов подземных вод определены по данным зимних межлетних расходов рек с ноября по март, когда реки покрыты льдом и в их питании принимают участие только подземные воды [7, 8].

Основные водоносные горизонты связаны с палеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими осадками различного литологического состава. Наличие мощных толщ карстующихся карбонатных и соленосных пород привело к развитию карста в Ангаро-Ленском артезианском бассейне и солянокупольной тектоники в отдельных районах южной части Якутского артезианского бассейна. Широко развиты тектонические разломы, которые определяют гидродинамику напорных вод. Именно к областям разломов в земной коре и карстовым районам чаще всего приурочены выходы подземных вод, в том числе соленых и рассолов. Кроме того, на гидродинамику подземных потоков влияет повсеместное развитие региональных водоупоров, связанных с соленосными толщами кембрия и девона, пластами траппов, глинами триаса и юры, толщами многолетнемерзлых пород.

По особенностям вертикальной гидрогеодинамической зональности и характеру взаимодействия подземных вод с поверхностным стоком гидрогеологические структуры Восточной Сибири можно разделить на три типа.

К структурам с активным водообменом подземных вод и поверхностного стока относятся территории, где система верхних водоносных горизонтов находится выше уровня многолетнемерзлых пород. Такие структуры представлены главным образом в зоне прерывистого и островного распространения мерзлоты. Водоносными породами здесь служат преимущественно карбонатные, терригенно-карбонатные и терригенные отложения с прослоями гипсов и ангидридов. Их суммарная мощность изменяется от 300 до 3000 м. Островной характер мерзлоты, карст и глубокие эрозионные врезы речных долин создают благоприятные условия для питания подземных вод. Они разгружаются в долинах рек, образуя многочисленные источники с напором от 0,5 до 200 л/с. Вода из карбонатных пород чаще всего пресная или слабосоленоватая гидрокарбонатно-сульфатная с минерализацией обычно 1–2 г/л, а из соленосных — хлоридно-натриевая (до 80 г/л). К структурам этого типа можно отнести также гидрогеологические системы складчатых областей южной и юго-западной частей Восточной Сибири с Алданским и Патомо-Витимским гидрогеологическими массивами. Здесь распространены трещинные воды в кристаллических и метаморфических породах, они связаны с зоной выветривания мощностью до 100 м и глубокими тектоническими разломами. Отдельные (чаще всего подводные) источники из этих пород имеют напор 3–10 л/с, групповые — до 300 л/с. Замерзая зимой, вода из особенно мощных источников часто образует наледи и полыньи. Высокой водообильностью отличаются также четвертичные и мезозойские рыхлые гравийно-галечниковые отложения речных долин. Воды в таких источниках обычно сульфатно-гидрокарбонатные с минерализацией около 0,3 г/л.

В среднем течении Лены распространены гидрогеологические структуры второго типа — с водоносными горизонтами замедленного водообмена и ограниченным взаимодействием подземных и поверхностных вод. Основные водоносные комплексы в этих структурах связаны с четвертичными, мезозойскими и верхнепалеозойскими отложениями. Резкое усиление суровости мерзлотных условий отражается в уменьшении количества и размеров таликов и приводит к сокращению питания и разгрузки подземных вод, которые связаны в основном с подрусовыми и подозерными несквозными таликовыми зонами. Поступление воды из скважин и родников здесь редко превышает 1 л/с, но в долине Лены иногда дости-



Река Лена.

flickr.com

гает 200 л/с, и в зимнее время рядом с такими источниками образуются устойчивые наледи [9]. Подземные воды, находящиеся ниже региональных водоупоров, могут выходить на дневную поверхность только по зонам тектонических нарушений. Восходящая фильтрация и выходы соленых вод и рассолов характерны для участков с аномально высоким пластовым давлением. Однако здесь же на значительных площадях установлены отрицательные гидродинамические аномалии — зоны, в которых уровни напорных вод в мезозойских отложениях опускаются на 100–400 м ниже уреза современной речной сети.

И наконец, артезианские бассейны, расположенные на севере Восточной Сибири, а также Анабарский и Оленекский гидрогеологические массивы относятся к структурам ограниченного взаимодействия подземных вод с поверхностными. В пределах этих структур распространены разнообразные по составу и возрасту водоносные комплексы от четвертичных отложений до кристаллических пород архея. Их объединяет глубокое промерзание верхних горизонтов (до 500 м и более), которое затрудняет взаимодействие подземных и поверхностных вод и способствует формированию гидродинамической зоны застойного режима. Однако подмерзлотные воды нередко обладают значительным напором и частично разгружаются в руслах крупных и средних рек. В связи с этим практически по всем замыкающим створам наблюдается рост меженного и минимального стоков как основных показателей возобновляемых ресурсов подземных вод.

Наиболее благоприятные условия формирования подземного стока на территории бассейна Лены существуют в его южной части, где на поверхность выходят ниже- и верхнекембрийские интенсивно трещиноватые и закарстованные отложения и выпадает наибольшее количество осадков.

Западные склоны Прибайкальских гор характеризуются повышенным увлажнением, так как Байкальский и Приморский хребты служат естественными преградами на пути влажных северо-западных ветров. Количество осадков в этом районе повышается до 450–600 мм/год. Модули речного стока\* достигают 15–20 л/(с·км<sup>2</sup>), а подземного — превышают 5 л/(с·км<sup>2</sup>). Закономерное увеличение модулей происходит по направлению к предгорьям. Модуль стока подземных вод на юге и западе Восточной Сибири в среднем составляет 1,9 л/(с·км<sup>2</sup>). Наименьших значений — менее 0,5 л/(с·км<sup>2</sup>) — среднемноголетние модули подземного стока достигают в центральной части Якутского артезианского бассейна, что обусловлено значительным погружением водоносных горизонтов и сплошным развитием многолетнемерзлых пород.

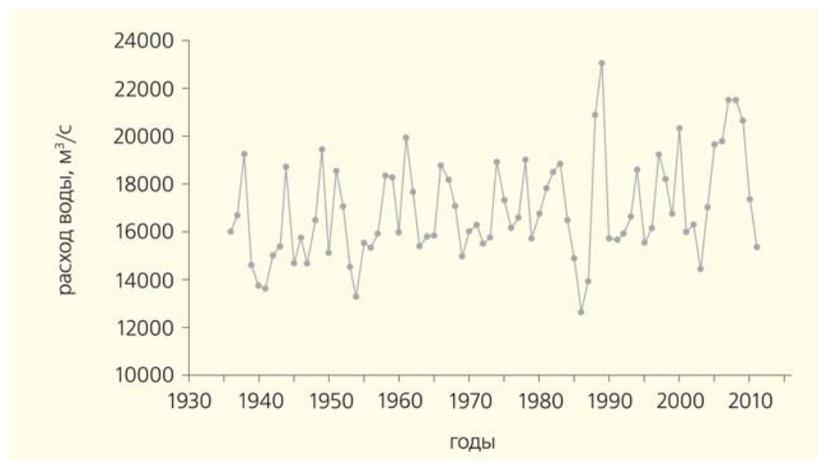
\* Модуль стока — объем стока в единицу времени с единицы площади водосбора.

## Факторы формирования водных ресурсов

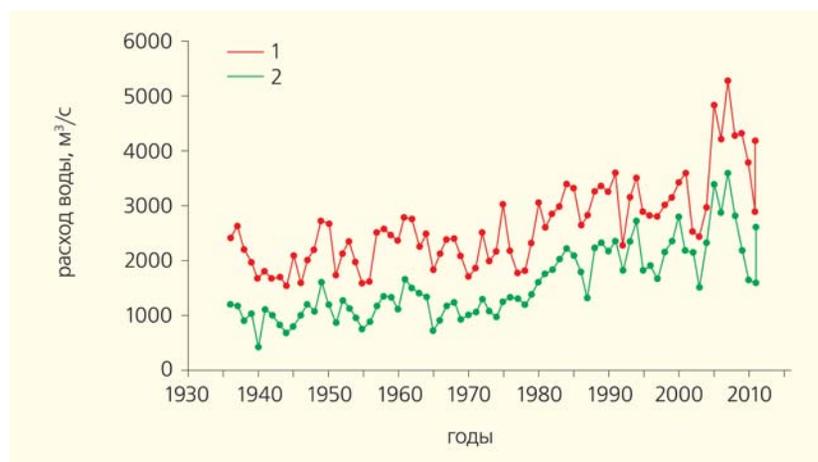
Среди факторов, определяющих процессы формирования и изменения ресурсов подземных и поверхностных вод Восточной Сибири, ведущая роль принадлежит климатическим характеристикам. Повышение годовой и особенно зимней температуры приводит к уменьшению не только глубины промерзания пород. За счет снеготаяния во время оттепелей формируется поверхностный сток и происходит пополнение запасов грунтовых вод. В связи с этим растут расходы зимнего подземного и поверхностного стока. Уменьшение мощности снежного покрова и водозапаса в нем приводит к уменьшению талого стока весной. Вклад оттепелей в увеличение зимнего стока малых и средних рек России за 1980–2012 гг. превышает 40%, в то время как влияние на сток уменьшения глубины промерзания и сокращения объемов аккумуляции влаги у фронта промерзания может достигать 60% [10, 11].

Сток крупных рек формируется в основном малыми притоками длиной до 15 км. Для бассейна Лены они составляют 70–80% протяженности гидрографической сети. Однако в условиях суровой зимы Сибири эти реки могут перемерзать или существенно сокращать свое живое сечение. Именно от соотношения между пропускной способностью участка реки и зимним меженным стоком зависит формирование наледей и поступление в реку подземных вод. Установлено, что при современном росте зимних температур уменьшается толщина речного льда, сток в малых реках сохраняется и, таким образом, повышаются расходы меженного (подземного) стока к концу зимы по ряду створов на Лене и ее притоках. При повышении зимних температур на 2–4°C меженный сток Лены и ее основных притоков (рек Витим, Алдан, Вилюй и др.) возрастает на 30% и более. Следовательно, ледяной покров малых и средних рек служит регулятором водообмена гидрографической сети с водоносными горизонтами, что особенно важно в последние десятилетия в связи с потеплением [10].

Долина нижнего течения Лены, Центрально-Якутская, Севе-



Средние годовые естественные ресурсы поверхностных вод бассейна Лены по замыкающему створу Кюсюр.



Естественные (возобновляемые) ресурсы подземных вод (1) и минимальные ресурсы (2) по замыкающему створу Кюсюр.

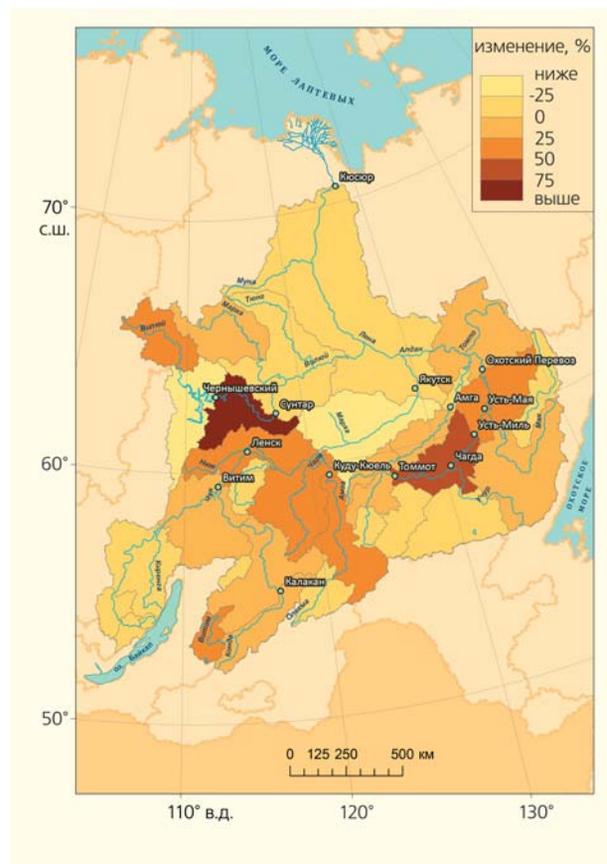
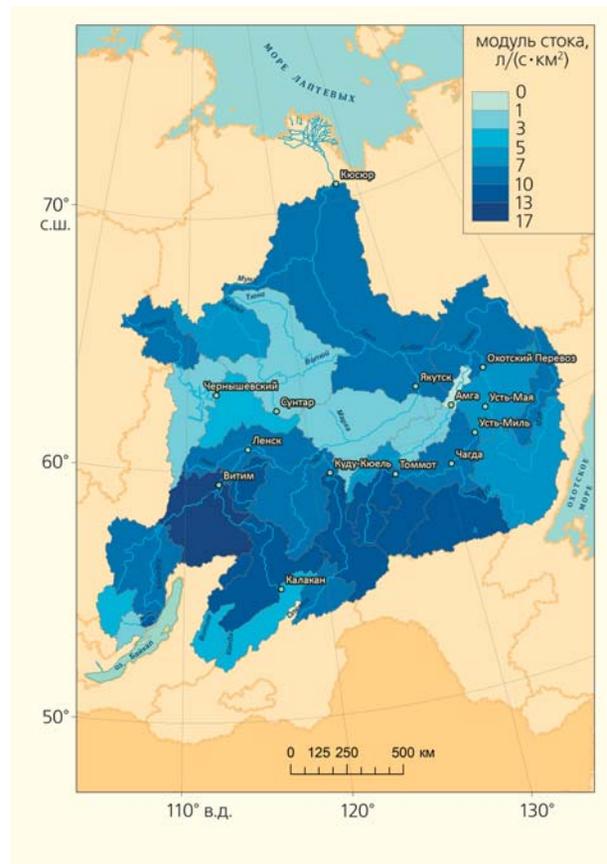
ро-Сибирская и Яно-Индибирская низменности сильно заболочены. Болотные массивы встречаются даже в горах. Скованная мерзлотой верхняя зона земной коры и продолжительные холода способствуют накоплению влаги. Глубина болот в Восточной Сибири, как правило, небольшая, так как в таких климатических условиях торф образуется медленно. Например, в Центральной Якутии на водоразделах мощность торфа составляет 0,4 м, а на речных террасах — до 1 м. Болота на осушенных и зарастающих термокарстовых озерах, напротив, отличаются значительной глубиной, достигающей 5 м в Верхоянском р-не и по берегам Лены и Алдана [12]. В связи с изменением климата болота становятся теплее, мерзлый торф и заторфованные породы оттаивают на большую глубину, особенно в речных долинах южной тайги. Поэтому болотные комплексы могут служить дополнительным источником питания малых и средних притоков Лены, Вилюя, Алдана и других рек в зоне островной и прерывистой мерзлоты.

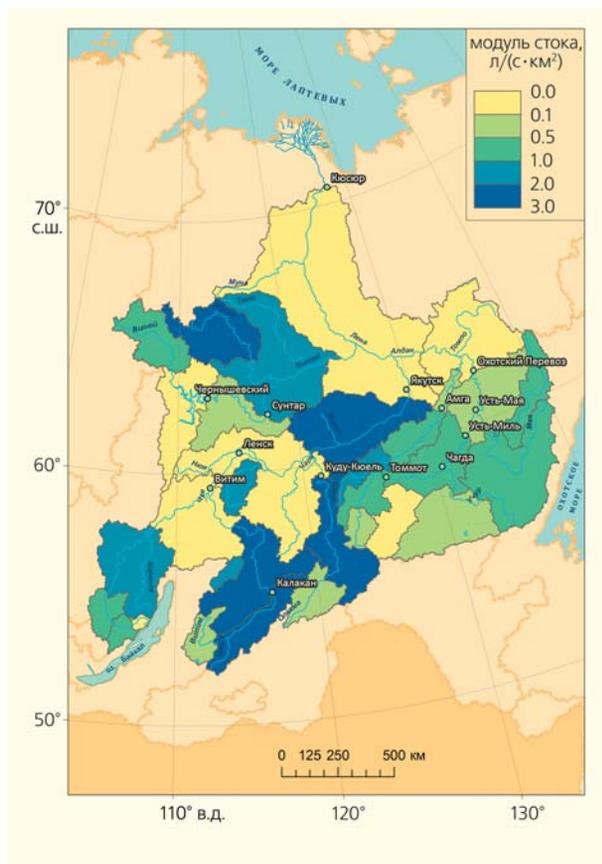
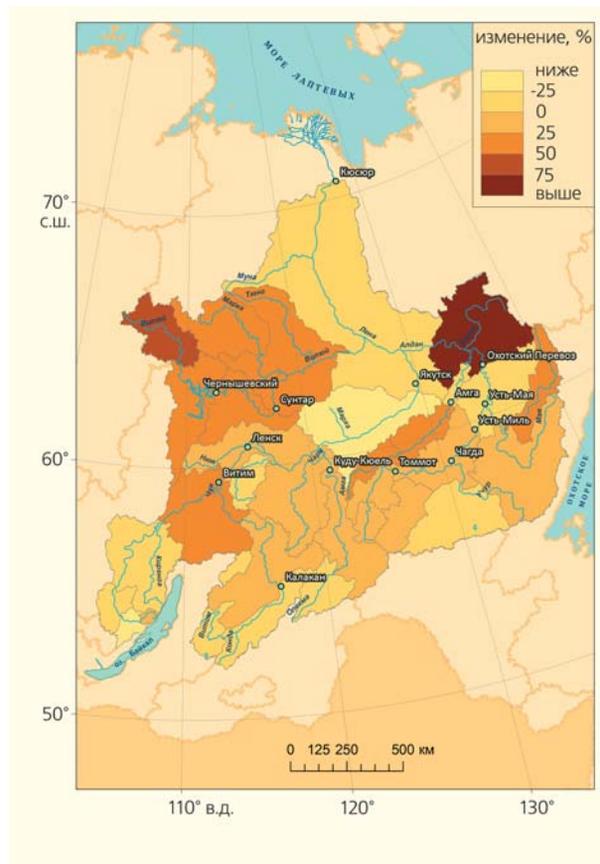
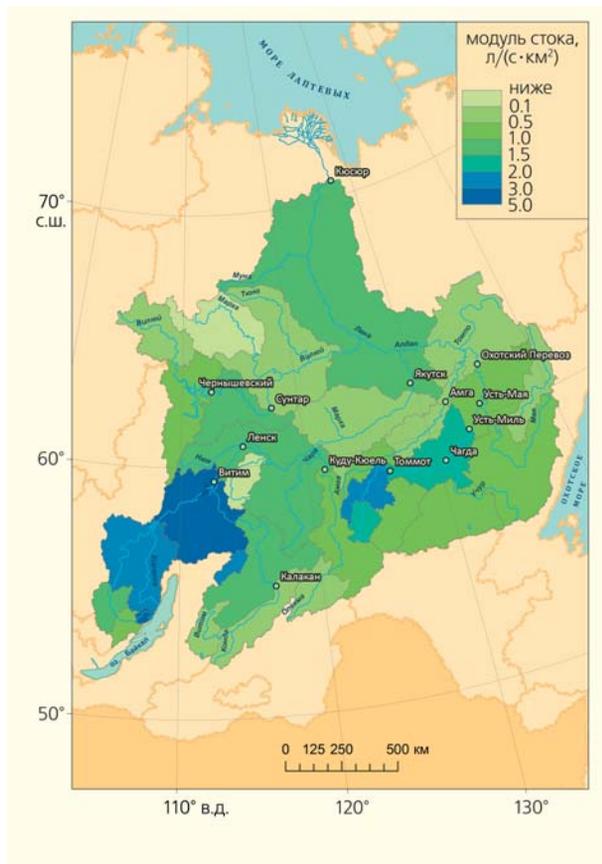
За счет более высоких годовых и сезонных температур последних лет и, следовательно, активного разложения болотной органики наблюдается усиление потока метана и диоксида углерода. В результате суммарное увеличение поступления метана из заболоченных массивов мерзлой зоны на территории России возрастает на 6–10 млн т/год. Таким образом, таяние болот в Сибири может привести к увеличению содержания метана в атмосфере и способствовать некоторому росту температуры воздуха.

### Изменения водных ресурсов Восточной Сибири

Мы обработали данные гидрологических наблюдений Росгидромета на 150 гидрометрических постах в бассейне Лены и 30 — в бассейне Колымы и оценили изменения стока за весь период наблюдений, и особенно за последние 30 лет. Выполненный анализ позволяет провести региональную переоценку годового, межennaleго и минимального стока по речным бассейнам и их частям, т.е. общих водных и возобновляемых ресурсов подземных вод. На большей части региона выпадает небольшое количество атмосферных осадков, но в условиях сурового климата и широкого распространения многолетнемерзлых пород испарение невелико, поэтому поверхностный и подземный сток здесь сравнительно высок. Судя по данным на створах Лены и ее притоков, водные ресурсы бассейна за последние десятилетия изменялись в разной степени. Однако

Средние годовые естественные ресурсы поверхностных вод бассейна Лены (вверху) и их изменения за 1978–2013 гг. по сравнению с 1945–1977 гг. (внизу).





Естественные ресурсы подземных вод бассейна Лены: средние годовые (вверху слева) и их изменения за 1978–2013 гг. по сравнению с 1945–1977 гг. (вверху справа), а также минимальные месячные в период зимней межени (внизу).

практически по всем замыкающим створам наблюдался рост не только годового, но и особенно меженного и минимального стока. В частности, годовой сток всего бассейна в замыкающем створе Кюсюр по сравнению с предыдущим 30-летним периодом вырос примерно на 5%, меженный — на 30%, а минимальный — на 80%. При этом малые речные водосборы более динамично реагируют на вариации климатических параметров (температуры, осадков) [13]. Так, возобновляемые ресурсы подземных вод в бассейнах рек Алдана и Амги за последние 30 лет увеличились до 100%.

Таким образом, можно заключить, что пополнение естественных ресурсов природных вод происходит из-за увеличения осадков, оттаивания мерзлых пород, роста заболоченности, уменьшения толщины льда на реках. Все это следствия глобального потепления, активизировавшегося в последние десятилетия. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-55-52008).**

## Литература / References

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 год. М., 2016. [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2015. Moscow, 2016. (In Russ.)]
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г. М., 2017. [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2016. Moscow, 2017. (In Russ.)]
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. [Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. Moscow, 2014. (In Russ.)]
4. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В. и др. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие. Метеорология и гидрология. 2015; 3: 97–108. [Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V. et al. Genetic disintegration of the runoff hydrograph. Russian Meteorology and Hydrology. 2015; 40 (3): 215–222.]
5. Джамалов Р.Г., Потехина Е.В. Природно-климатические и антропогенные причины изменения подземного стока бассейна Лены. Электронное научное издание ГЕОразрез. 2010; 1. [Dzhamalov R.G., Potekhina E.V. Natural-climatic and anthropogenic causes of changes in the underground flow of the Lena basin. Electronic scientific edition GEOrazrez. 2010; 1. (In Russ.)]
6. Кирюхин В.А., Толстикин Н.И. Региональная гидрогеология. М., 1987. [Kiryukhin V.A., Tolstikhin N.I. Regionalnaya gidrogeologiya. Moscow, 1987. (In Russ.)]
7. Водные ресурсы России и их использование. Ред. И.А.Шикломанова. СПб., 2008. [Water resources of Russia and their use. Shiklomanov I.A. (ed.). Saint-Petersburg, 2008. (In Russ.)]
8. Джамалов Р.Г., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И. Современные изменения водных ресурсов в бассейне р.Лены. Водные ресурсы. 2012; 39(2): 131–145. [Dzhamalov R.G., Krichevets G.N., Safronova T.I. Current changes in water resources in Lena River basin. Water Resources. 2012; 39(2): 147–160.]
9. Куделин Б.И. Подземный сток на территории СССР. М., 1966. [Kudelin B.I. Podzemnyj stok na territorii SSSR. Moscow, 1966. (In Russ.)]
10. Марков М.Л. Проблемы оценки естественных ресурсов подземных вод по гидрологическим данным в условиях изменения климата. Ресурсы подземных вод: современные проблемы изучения и использования. Материалы международной научной конференции. М., 2010; 94–98. [Markov M.L. The problems of assessing the natural resources of groundwater in terms of hydrological data under conditions of climate change. Proceedings of the International Scientific Conference «Groundwater Resources: Present Problems of Survey and Use». Moscow, 2010; 94–98. (In Russ.)]
11. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России: формирование, распределение, использование. Ред. Р.Г.Джамалов, Н.Л.Фролова. М., 2015. [Sovremennyye resursy podzemnykh i poverkhnostnykh vod evropeyskoj chasti Rossii: formirovaniye, raspredeleniye, ispol'zovaniye. Dzhamalov R.G., Frolova N.L. (eds.). Moscow, 2015. (In Russ.)]
12. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет. Криосфера Земли. 2009; 13(2): 16–26. [Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Changes in thermokarst lake size in different regions of Russia for the last 30 years. Earth's Cryosphere. 2009; 13(2): 16–26. (In Russ., abstr. in Engl.)]
13. Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы. Ред. Георгиади А.Г., Золотокрылин А.Н., Десяткин Р.В. и др. М.; Тверь, 2007. [Heat and water exchange in permafrost landscapes of Eastern Siberia and its factors. Georgiadi A.G., Zolotokrylin A.N., Desyatkin R.V. et al. (eds.). Moscow; Tver, 2007. (In Russ.)]

## Modern water resources of Eastern Siberia

R.G.Dzhamalov, T.I.Safronova  
*Water Problems Institute, RAS (Moscow, Russia)*

Over the past decades, Eastern Siberia has experienced significant warming. It is considered climatic characteristics changes, which led to an increase in the temperature of surface air and atmospheric humidity as well as the increase in the thawing depth of permafrost and bogs. More over are considered the changes in the values of river and underground runoff. The estimation of modern resources of surface and underground waters of Eastern Siberia and their changes in conditions of unsteady climate is carried out. The main factors of formation and spatial-temporal distribution of resources of underground and surface waters are revealed. The maps of water resources and their minimum monthly values are constructed on a quantitative basis.

**Key words:** water resources, river run-off, groundwater, permafrost, climate.

# Ульбанский залив

А.Н.Махинов<sup>1,2</sup>, М.В.Крюкова<sup>1</sup>, В.В.Пронкевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем ДВО РАН (г.Хабаровск, Россия)

<sup>2</sup> Тихоокеанский государственный университет (г.Хабаровск, Россия)



В статье приведены результаты комплексных географических исследований Ульбанского залива — одного из самых труднодоступных районов побережья Охотского моря. Рассматриваются особенности рельефа и экзогенных процессов, поверхностных вод, растительного и животного мира. Оценена роль приливов и ледовых явлений в динамике берегов и строении русел устьевых участков рек, впадающих в залив. Установлена существенная ландшафтная неоднородность побережья. Изучены степень биоразнообразия в различных природных комплексах и состояние редких видов растений и животных. Выявлены основные факторы риска для популяций редких и исчезающих видов птиц (как размножающихся, так и мигрирующих) в исследованной части побережья. Наиболее существенное негативное воздействие оказывают пожары, уничтожающие значительные площади лесных массивов и приморских лугов. Для сохранения уникальных ландшафтов побережья Ульбанского залива, обитающих здесь редких видов растений и животных рекомендуется создание особо охраняемой территории краевого значения, в пределах которой необходимо ограничить хозяйственную деятельность.

**Ключевые слова:** Охотское море, Ульбанский залив, строение берегов, растительность, животный мир.

**Ю**го-западное побережье Охотского моря относится к труднодоступным, слабо освоенным, почти неизученным, но особо привлекательным для туристов районам страны. Живописные берега, суровый климат, высокие приливы, припайные ледовые поля и дрейфующие по заливу ледяные горы-стамухи весной, частые миражи летом, грандиозные обвалы, высокие водопады с наледями до начала осени у подножий береговых уступов создают особый, фантастический пейзаж. Поражает разнообразный и богатый мир морских и сухопутных животных, уникальная приспособленность многих видов растений к необычным природным условиям.

Глубоко вдающиеся в сушу большие мелководные заливы — Тугурский, Ульбанский, Константина и Николая разделяются гористыми полуостровами Тугурским и Тохареу, далеко выступающими в морскую акваторию. Заливы известны своими типичными для Дальнего Востока биологическими ресурсами — рыбой, крабами, морским зверем; в них постоянно обитают большие стада китов, косаток, белух. Береговые горные массивы и хребты местами обрываются к морю высокими уступами или крутыми склонами. Вблизи вершин и по распадкам в начале лета белеют пятна снежников. Полосой вдоль берегов заливов протягиваются обширные заболоченные низменности с высокими бугристыми грядами, термокарстовыми озерами и прибрежными маршами. К северу от заливов располагается большой архипелаг — Шантарские о-ва, которые



**Алексей Николаевич Махинов**, доктор географических наук, заместитель директора по научной работе Института водных и экологических проблем ДВО РАН, профессор Тихоокеанского государственного университета. Область научных интересов — экзогенные процессы формирования рельефа, оценка воздействия природных и антропогенных факторов на окружающую среду.



**Мария Викторовна Крюкова**, доктор биологических наук, заместитель директора по научной работе Института водных и экологических проблем ДВО РАН. Научные интересы связаны с биогеографией, флористикой, сохранением биологического разнообразия.



**Владимир Валентинович Пронкевич**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии животных того же института. Занимается изучением орнитофауны, миграционных потоков птиц в Нижнем Приамурье и Юго-Западном Приохотье, оценкой состояния популяций редких и исчезающих видов птиц.

еще несколько десятков тысяч лет назад составляли с континентом единое целое.

Впервые острова и заливы видели землепроходцы Василия Пояркова более 370 лет назад, но в своих отписках путешественники ничего об этом не сообщили. Острова были вторично открыты и нанесены на карты лишь в середине XIX в. Первые научные наблюдения на берегах заливов провел А.Ф.Миддендорф, сделавший довольно подробное

описание морского побережья, рек, растительности и животного мира. С 5 по 25 августа 2016 г. комплексные экспедиционные работы в этой части Охотского моря проводил Институт водных и экологических проблем ДВО РАН. В результате исследований собран обширный материал о современном экологическом состоянии побережья.

Заливы образовались во время послеледниковой трансгрессии моря, начавшейся 17–15 тыс. лет назад и продолжающейся до настоящего времени. Поэтому береговая линия здесь очень молода [1]. Она особенно активно формируется на выступах берегов в результате интенсивных абразионно-денудационных процессов, разрушающих даже прочные скальные породы. В углублениях береговой линии, наоборот, аккумулируются морские и принесенные реками рыхлые, преимущественно галечно-валунные отложения в виде вновь формирующихся и разрастающихся более древних пляжей и кос [2]. Береговая линия заливов слабо изрезана и нигде не образует закрытые от ветров, удобные для стоянки бухты. Лишь местами встречаются совсем небольшие, ограниченные с боков высокими скалами уютные бухточки с песчаными пляжами, где можно легко высадиться на берег.

Среди этих глубоко вдающихся в сушу морских акваторий особо выделяется Ульбанский залив. Он широко открыт в сторону моря и постепенно суживается вглубь. Длина залива составляет 90 км, ширина на входе мысами Укурунру и Тукургу — 47 км. Общая площадь акватории — 2100 км<sup>2</sup>.

Максимальная глубина на границе с заливом Академии составляет 30–32 м. Коса Бетти делит залив на две неравные части — крупную восточную с наибольшими глубинами и твердым галечно-песчаным дном и небольшую западную — более изолированную от моря, с глубинами до 10 м и обширными глинистыми осушками. Вдоль берега западной части залива протягиваются заболоченные низменности, пересекаемые наиболее крупными реками Ульбан и Сыран.

Ульбанский залив расположен на широте 53°30', что в Западной Европе соответствует побережью Голландии, а в Северной Америке — самой южной части Гудзонова залива. Однако климат здесь отличается значительной суровостью и контрастностью. Причина этого — в неоднородном строении рельефа, в особенностях влияния на климат регулярно проникающих сюда студенов арктических воздушных масс зимой и душных тропических — летом, а также в близости самых холодных континентальных территорий Северного полушария (северо-востока Якутии) и аномально холодного для данных широт Охотского моря. На равнинах и в горах местами распространены многолетнемерзлые горные породы, что осложняет и без того пестрый ландшафтный облик территории.

Воздействие всех этих факторов выражается в относительно низких летних температурах и продолжительных морозящих дождях, очень холодной погоде зимой, обильных снегопадах при вторжении в конце зимы на сушу морского влажного воздуха, сильных ветрах в течение всего года.



Карта юго-западного побережья Охотского моря.

Средняя многолетняя годовая температура воздуха, по данным ближайшего метеорологического поста Тугур, равна минус 3.3°C. Средняя январская температура составляет минус 20.8°C при минимальном значении минус 26.2°C. Средняя многолетняя температура воздуха в июле — 10.5°C при максимальном значении 13.6°C. Продолжительность вегетационного периода составляет всего 84 дня [3].

За год выпадает в среднем 589 мм осадков. Их количество варьирует от 339 до 824 мм. Самым дождливым месяцем считается август, зимой осадков выпадает значительно меньше, чем летом. Средняя годовая скорость ветра составляет 2.5 м/с, преобладают ветры западного и юго-восточного направлений. На побережье и в акватории залива часто бывают туманы, особенно плотные в утренние часы. Среднее число дней с туманами — 47, из них 31 день приходится на летние месяцы.

Характерная особенность акватории — высокие приливы со сложными приливно-отливными течениями. Высота подъема воды превышает 5 м, а во время нагонов со стороны открытого моря достигает 6 м. Во время отливов в южной и западной частях залива на время открывается обширная илистая осушка. Летом темный ил за несколько часов нагревается так сильно, что температура воды на осушке во время прилива достигает 25°C. В безветренную погоду при отсутствии волн мутность воды незначительна, и она вполне пригодна для купания. Скорость течения превышает 1.0 м/с, что позволяет проплывать до 40 км за сутки, двигаясь вдоль берега в сторону моря при отливе и вглубь залива при приливе.

Морфологический облик берегов Ульбанского залива весьма разнообразен, но в основном здесь распространены высокие денудационно-абразионные уступы, достигающие наибольшей высоты на отрогах береговых горных массивов. Миддендорф писал: «Край материка, ограждающий Охотское море с юга, состоит из крутых гор... <...> ...Они почти всегда представляют отвесные или нависшие стремнины... выступающие из береговой линии в виде многочисленных мысов» [4]. Береговые обрывы формируются под воздействием комплекса факторов, среди которых наиболее существенными можно считать ветровые волны, денудацию (выветривание, оползни, обвалы, осыпи), снежные лавины и морской лед. Северо-западное побережье залива сложено преимущественно магматическими породами — верхнемеловыми андезитами, прорванными небольшими интрузиями гранитов и гранодиоритов также позднемелового возраста. Гранитоидные породы выступают в море в виде высоких скал, создавая величественные отвесные обрывы высотой в сотни метров. Самые массивные и высокие из них образовали заметные издали мысы Заржецкого и Укурунру.

С юга и юго-востока залив обрамляют невысокие, но густо изрезанные долинами малых рек го-

ры, сложенные прочными осадочными породами — юрскими песчаниками и алевролитами. Они обрываются к морю крутыми уступами высотой 150–200 м, достигая местами 350–400 м. Порода в стенках обрывов разбиты многочисленными трещинами и зонами тектонических нарушений. По этим зонам наиболее часто происходят обвалы, осыпи, а весной здесь сходят небольшие снежные лавины, создавая ребристость склонов гор. С них к подножию поступает большое количество глыбисто-щебнистого материала. Однако нередко у подножий даже высоких уступов скопления обломков незначительны или совсем отсутствуют вследствие активной волновой деятельности, а также существенной роли морских льдов в перемещении обломочного материала в береговой зоне, что особенно характерно для приливных морей [5].

Несомненно, что многие из грандиозных обвалов представляют собой сейсмообвалы, широко распространенные на других участках побережья Охотского моря [6]. Свежие, почти отвесные стенки срыва огромных блоков пород занимают часто весь склон от вершины до основания, поражая своими размерами.

К скальным выходам приурочен специфичный комплекс петрофильных растений, которые находят для себя подходящие местообитания на уступах, карнизах, в трещинах скал. Непрístupные каменные стены оживляет разноцветье лапчатки земляникоподобной, гвоздики ползучей, родиолы розовой, желтушника Палласа, полины северной, живучника камчатского, норичника амгуньского. Специфика растительного комплекса скал определяется присутствием растений — эндемиков охотоморского побережья (зорьки аянской, остролодочника Траутветтера и Тилинга, валерианы аянской), а также распространенными вдоль побережий дальневосточных морей астрокодоном распростертым и овсяницей мягчайшей. Многие из этих видов в связи с ограниченным ареалом, низкими показателями встречаемости (из-за узкой приуроченности к скальным местообитаниям) включены в Красные книги Российской Федерации [7] и Хабаровского края [8].

Наклонные бенчи, соединяющие подножия уступов абразионно-денудационных и абразионных берегов с осушкой, перекрыты столь малым количеством рыхлых отложений, что более половины их поверхности сложено выступающими коренными породами, которые разрушены выветриванием и обработаны абразией и льдом. Таким образом, отступление уступа и снижение поверхности бенча происходят одновременно, что приводит к образованию единой системы уступ—бенч. Чем интенсивнее разрушается бенч, тем сильнее сказывается воздействие абразионных и ледовых процессов на уступ.

Многочисленные горные речки со значительными уклонами и стремительным течением впадают в море. Они выносят большое количество



Сбросообвал на южном берегу Ульбанского залива.

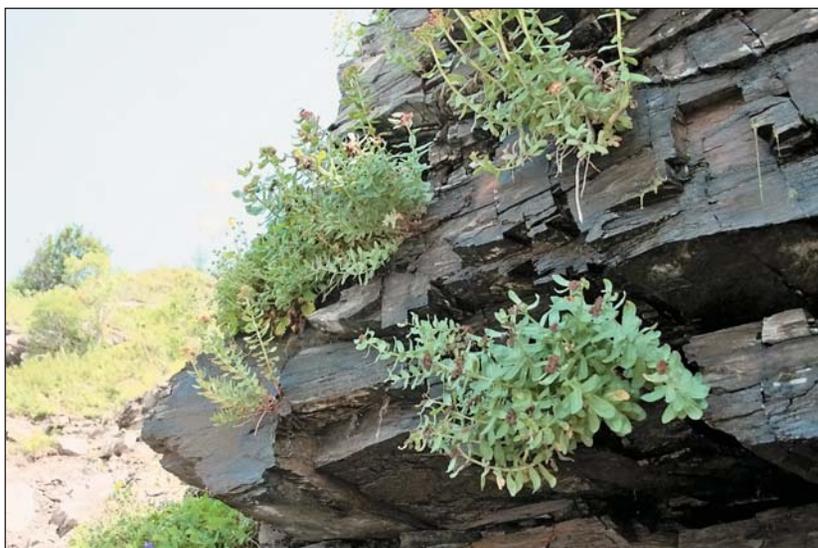
Фото А.Н.Махинова

крупнообломочного (галечно-валунного) материала, образующего аккумулятивные тела в виде конусов выноса. Часто встречаются водотоки с висячими устьями и живописными водопадами и даже каскадами высотой 10–20 м. Выше водопадов русла обычно образуют короткие узкие ущелья глубиной 8–10 м в более широких днищах до-

лин, постепенно выклинивающиеся вверх по течению. Такие молодые врезы сформировались на последнем этапе развития долин в условиях активного абразионного разрушения берегов.

Там, где горы отходят вглубь суши, образовались неширокие заболоченные низменности с вытянутыми вдоль берега пресноводными лагунами, которые отделены от моря протяженными и высокими штормовыми валами. Севернее мыса Обрывистый находятся самые крупные озера — Проточные и Лагунное. Менее значительные озера образовались близ устьев рек Токарева и Иткан.

В западной части залива протягивается обширная заболоченная низменность — она образована аллювиальными отложениями, которые принесены с удаленных от моря гор реками Ульбан, Сыран и Эльго. Основную часть ее поверхности занимает бугристо-западинный мезорельеф. Торфяные бугры достигают в высоту 5 м и в виде причудливо-извилистых гряд протягиваются на сотни метров. Склоны бугров крутые, местами отвесные. Многолетняя мерзлота на



Родиола розовая. У нее нет конкурентов в освоении отвесных береговых обрывов.

Фото М.В.Крюковой

них оттаивает к концу лета всего на 0,6–0,8 м. Западины между такими буграми представляют собой заросшие днища бывших термокарстовых озер [9].

Большие пространства на равнинных территориях в долинах рек занимают сфагновые болота и мари с лиственницей Каяндера и кедровым стлаником, чередующиеся с травяно-моховыми болотами, ерниковыми зарослями. Растительный покров заболоченных низинных территорий малоспецифичен и характеризуется низкими показателями видового разнообразия по сравнению с луговыми и лесными сообществами. Вместе с тем он выполняет важные средоформирующие, водоохраные и водорегулирующие функции, а также представляет значительную ценность в качестве основных биотопов для размножения редких и исчезающих птиц охотоморского побережья и для их массовых скоплений в периоды миграций.

В прилив подпор по рекам распространяется вверх против их течения на 35–40 км. В низовьях эти реки приобрели своеобразную морфологию русла, обусловленную влиянием приливов на скорость течения. На протяжении нескольких десятков километров русла их представляют собой каналы с крутыми глинистыми берегами и ровным дном. В их формировании существенную роль играют стремительные стоковые течения при отливах и речные льды, производящие экзарационную работу в зимнее и весеннее время. При этом сами реки сильно петляют, образуя местами почти полные окружности.

Морские пляжи также отличаются специфическим строением, обусловленным высокими приливами и значительной экзарационной деятельностью морского льда. Ширина их редко превышает 60 м, а штормовые валы прислонены к подножиям денудационно-абразионных уступов. Рыхлые отложения на пляжах распространены неравномерно: их мощность может достигать нескольких метров, а на участках скальных выходов они могут полностью отсутствовать. Местами скальные выходы образуют коренные или глыбистые бенчи.

На берегах, открытых интенсивному волновому воздей-



Бугристая марь в нижнем течении р.Ульбан.

Фото М.В.Крюковой

вию, пляжи имеют полный профиль. Они представляют собой штормовые валы шириной 100–120 м и высотой до 8 м над средним уровнем моря. Наиболее древние их участки заросли ельниками, а молодые — приморскими лугами.

Основу растительных группировок морских пляжей составляют виды супралиторального галофитного комплекса: гления прибрежная, лигустикум шотландский, мертвенция приморская, крестовник лжеарниковый, горошек японский. Они не образуют сомкнутых сообществ, характер их распространения вдоль морских пляжей и кос мозаично-групповой. По мере удаления от уреза воды



Русло р.Сыран в низовьях.

Фото А.Н.Махинова

характер растительности меняется. Несомкнутые группировки супралиторального комплекса сменяются приморскими лугами, образованными колосняком мягким, мятликом крупночешуйным, арктомятликом выделяющимся со значительным участием розы морщинистой и разнотравья — лилии пенсильванской, ириса щетинистого, бузульника Фишера, купальницы китайской, термopsis, гастролыхниса скального, герани волосистоцветковой, яркие соцветия которых украшают морские берега в короткое охотоморское лето. На более высоких участках береговых валов у подножия денудационно-абразионных уступов узкой полосой распространены еловые, лиственничные или смешанные леса.

Наиболее крупная и своеобразная аккумулятивная береговая форма в Ульбанском заливе — это коса Бетти. Она расположена в западной части залива и протягивается перпендикулярно берегу с севера на юг почти по прямой линии на 4 км. У основания косы ее ширина 120–130 м, а высота около 7–8 м. В южной части, вблизи своего окончания, коса суживается до 100 м и снижается до 6–7 м. К западу от нее в мелководной части залива



Гастролыхнис скальный.

Фото М.В.Крюковой

значительную площадь занимает осушка, за которой протягивается полоса травянистых маршей (Широкая лайда). Вдоль восточного берега отмечаются большие глубины, здесь не гасятся высокие штормовые волны, накатывающие с открытой к морю части залива. Подходя к косе под углом, волны перемещают вдоль нее довольно крупные обломки горных пород. Поэтому коса сложена крупногалечниковым и мелкогалечным материалом хорошей окатанности. В нескольких наиболее пониженных местах она прорвана неширокими (20–50 м) ложбинами со следами свежих размывов, образованными переливами воды во время наиболее мощных штормов.

При отливе значительная часть акватории освобождается от воды, обнажая глинистое, но твердое дно осушки. В вершине залива ее ширина достигает 300 м, далее к востоку, в сторону устья р.Иткан, уменьшается до 100–150 м. Осушка сложена песчано-мелкогалечным материалом с включением валунов и отдельных глыб. Вблизи ее морского края в составе отложений преобладают плотные илесто-глинистые морские осадки. Впадающие в залив ручьи формируют на осушке широкие плоские конусы выноса с высоким содержанием галечно-валунного материала.

Поверхность осушки изрезана извилистыми ложбинами глубиной 0.7–1.0 м и шириной до 5 м. Сток по таким ложбинам осуществляется в течение всего времени отлива, сильно уменьшаясь к началу прилива. Сливающаяся с осушки вода движется с большой скоростью, производя эрозионную работу. В прилив по этим ложбинам морская вода затапливает осушку.

На осушке и в толще ее отложений заключено большое количество крупнообломочного материала — дресвы, щебня, гальки и валунов. Изредка встречаются погруженные в илистый грунт или лежащие на поверхности глыбы размером до 2×3 м и массой более 20 т. Они переносятся льдом от подножий высоких денудационно-абразионных уступов на большие расстояния, оставляя на поверхности узкие и довольно глубокие извилистые ложбины [10].

Среди осушки часто встречаются выступы коренных пород. Высота их достигает местами 3 м, а поверхность подвержена воздействию процессов выветривания и ледовой обработки. На протяжении выступающих в морскую акваторию мысов возвышаются кекуры (скальные останцы) различной формы и размеров. Иногда они образуют группы из нескольких высоких причудливых скал, расположенных рядом.

За пределами осушки вдоль края низких аккумулятивных равнин местами широкой полосой протягиваются влажные луга с многочисленными понижениями, заполненными водой. Они представляют собой северные разновидности маршей. В высокие сизигийные приливы их поверхность затапливается на непродолжительное время.



Коса Бетти.

Здесь и далее фото А.Н.Махинова

В пределах маршей распространены весьма специфичные низкотравные приморские луга, образованные галофитными видами: триостренниками азиатским и болотным, бескильницей ползучей, арктоцветником арктическим, крестовником лжеарниковым, лапчаткой Эгеда. Наиболее низкие участки занимает солерос европейский, выдерживающий длительное затопление морскими водами. Он растет там, где большинство других видов не способны развиваться вследствие высокой концентрации солей, почти полного отсутствия плодородного слоя, недостатка кислорода (при погружении в морскую воду) и воздействия приливных волн.

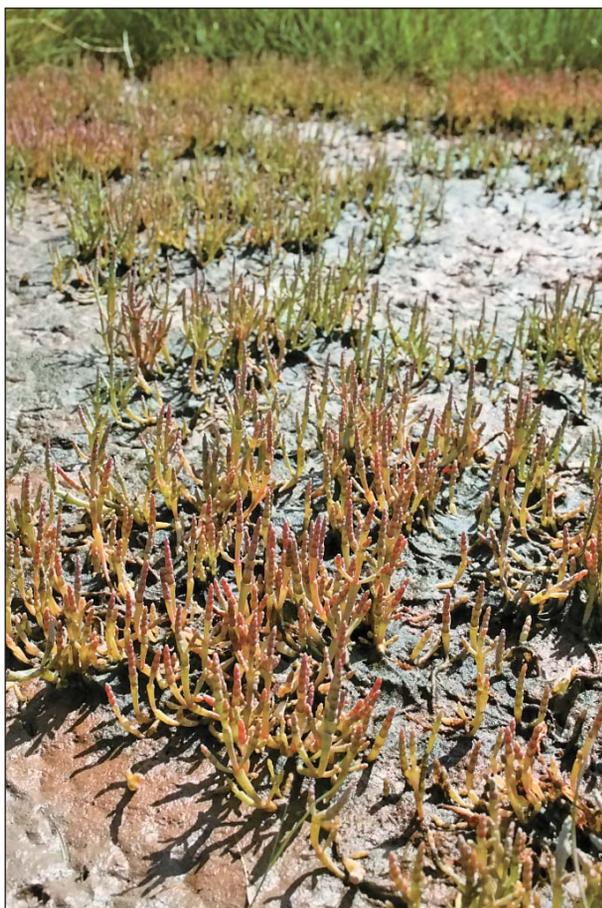
По мере удаления от уреза воды низкотравные приморские луга сменяются на высокотравные, эдификаторами которых



Осушка в конце отлива.



Морские заливные луга — северные марши.



Солерос европейский.

Фото М.В.Крюковой

служат достаточно крупные, достигающие полутораметровой высоты злаки — колосняк мягкий и арктомятлик выделяющийся. Среди разнотравья встречаются термопсис, вика японская, ситник Генке, соссурия голая, ложечница аптечная, лапчатка Эгеда и др. На значительных пространствах аккумулятивных равнин в приустьевых участках рек приморские колосняковые, колосняково-кострецовые, арктомятликовые, колосняково-разнотравные монодоминантные или с незначительным участием других галофильных видов луга переходят в заболоченные разнотравно-осоковые луга, доминантами которых выступают осоки буроватая, скрытоплодная, редкоцветковая. Они чередуются с разнотравно-кустарничковыми группировками шикши, ивы черничной, восковника пушистого, а также дерена шведского.

Эти заболоченные луга образуют значительную по площади переходную зону между приморскими лугами и болотами, которая находится под влиянием высоких морских приливов.

Ульбанский залив — излюбленное место обитания и размножения гренландских китов, несколько десятков которых постоянно живут здесь летом. Они привлекают сюда косаток, устраивающих коллективную охоту на этих морских исполинов. Как правило, для хищников охота заканчивается успешно. Нередко атаку удается наблюдать вблизи, так как киты стараются держаться мелководных участков у берегов, чтобы избежать нападения или создать трудности для атак со всех сторон. По берегам залива всегда можно увидеть разложившиеся или свежие трупы китов.

Огромные косяки рыб, идущие летом на нерест в горные реки, становятся лакомой добычей белух и нерп. Они группируются в большие стада в море близ устьев или в низовьях рек. Иногда кажется, что вода кипит от их всплесков на поверхности. После удачной охоты неподалеку от устьев больших рек отдыхают лахтаки, подпускающие к себе на довольно близкое расстояние одинокого, не делающего резких движений человека.

На суше поражает большая плотность бурых медведей. Они встречаются повсюду — в прибрежных лесах, на лугах, болотах, морских пляжах и косах и даже на осухе; повсюду в грязи заметны цепочки глубоких следов. Вдоль берегов рек постоянно попадают хорошо набитые ими тропы. Медведи не боятся людей, однако, увидев плывущие моторные лодки, все же пытаются скрыться из виду.

Благоприятное сочетание различных биотопов, включающее богатые морскими беспозвоночными зоны осушки, осоково-злаковые низкотравные переувлажненные марши, приморские злаково-разнотравные луга, бугристо-западинные болота, термокарстовые озера, распространенные на заболоченных массивах, определяет высокое разнообразие водных и околоводных птиц.

Особенно значимы для орнитофауны биотопы приморских лугов и зоны осушки — как места корма, линьки и выращивания молодняка. На приливно-отливной зоне в отдельные периоды летне-осеннего пролета численность одновременно останавливающихся мигрантов достигает 20–30 тыс. особей. В период размножения эти местообитания используются исчезающими видами мировой орнитофауны — сухоносом и охотским улитом.

С орнитологической точки зрения интересны биотопы бугристых болот как экотонные территории на стыке нескольких типов местообитания — рек, озер, приливно-отливной зоны, приморских лугов и болот. Здесь отмечено около 30% орнитофауны прибрежных территорий, из них 20% видов гнездятся на месте, прочие относятся к пролетным. Здесь же в сезон размножения и в периоды сезонных миграций регулярно встречаются черный журавль, лебедь-кликун, сухонос, полевой лунь, камчатская крачка и другие виды, включенные в Красные книги Российской Федерации и Хабаровского края.

Богатство рек, впадающих в Охотское море, и морских заливов различными видами пресноводных и морских рыб определяет также и обилие птиц-ихтиофагов. Здесь отмечены гнездящиеся скопа, орлан-белохвост и белоплечий орлан.

В весенний период приливная зона слабо используется птицами для остановок, так как значительная ее площадь покрыта льдом. Толщина ледяного панциря, образовавшегося за зиму под действием приливных явлений, в некоторых случаях достигает 3 м. Очевидно, что кормовой потенциал промороженной за зиму приливной зоны несравнимо ниже, чем в летне-осенний период. Кроме того, характер весеннего пролета прибрежных птиц, видимо, не предполагает долгих кормовых остановок. Многие птицы транзитом и на значительных высотах преодолевают миграционное пространство. В отличие от прочих местообитаний, приливная зона может использоваться птицами только в качест-



Лактак.

Здесь и далее фото В.В.Пронкевича

ве кормового биотопа, регулярное затопление и волнение не позволяют жить здесь даже видам с плавающими гнездами.

Максимальные пики в динамике видового богатства и общей плотности птиц на прибрежных территориях наблюдаются в период южного пролета в июле и августе, что связано с характером миграции, когда пролетные виды надолго задерживаются для восполнения энергетических запасов, необходимых для дальнего броска через обширные малокормные пространства.

Деградация этих ключевых для орнитофауны местообитаний может отрицательно сказаться на благополучии отдельных популяций и видов птиц в целом. Проблема сохранения редких и исчезаю-



Охотский улит.



Галстучник.

щих видов — во многом проблема сохранения их местообитаний. Состояние этих территорий в настоящее время оценивается как удовлетворительное, но вместе с тем для орнитофауны существуют определенные угрозы. В ходе экспедиционных работ были выявлены основные факторы рисков для популяций редких и исчезающих видов птиц, размножающихся в исследованной части побережья Охотского моря, а также для мигрирующих птиц. Наиболее существенными оказались пожары, которые уже погубили значительные площади лесных территорий на горных массивах вдоль побережья. Огонь уничтожает деревья, служащие гнездовыми опорами орланов. Пожары распространяются на болотные и луговые сообщества, используемые многими видами птиц для создания гнезд.

Рассматриваемая территория труднодоступна и безлюдна. Южное побережье Ульбанского залива удалено от районного центра пос.Чумикан к юго-востоку на 200 км, от Амура — на 150 км, от ближайшего населенного пункта с.Тугур Тугуро-Чумиканского р-на — на 60 км. Попастъ сюда можно по труднопроходимой автомобильной грунтовой дороге от Комсомольска-на-Амуре до залива Николая и далее морем. Другой путь — от речного порта Оглонги на р.Амгунь по дороге протяженностью около 140 км к заливу Николая. Ближайшая железнодорожная станция Березовый на Байкало-Амурской магистрали находится на расстоянии 250 км по прямой линии.

Тем не менее разнообразные природные ресурсы привлекают в этот район людей. На берегу Ульбанского залива имеются сезонные предприятия по добыче и переработке рыбы, а в бассейнах притоков верхних течений рек Ульбан, Сыран

и Иткан ведется разработка небольших россыпных месторождений золота. Антропогенные нагрузки на побережье в связи с труднодоступностью территории выражены слабее, чем на внутриматериковых территориях, и связаны они в основном с пожарами, рекреационной деятельностью и браконьерством. Пожары не только уничтожают растительность, но и способствуют активизации склоновых процессов, формированию курумов и оползней. Такие участки резко контрастируют с лесными массивами на склонах, где даже при большей крутизне поверхности процессы разрушения выражены намного слабее.

Для сохранения популяций гнездящихся и мест массовых скоплений мигрирующих птиц предлагается организация в заливах Ульбанском, Николая

и Константина особо охраняемой природной территории краевого значения — водно-болотного угодья, которое будет включать весь комплекс морских, пресноводных и наземных экосистем. Они характеризуются высокой степенью биологического разнообразия и имеют первостепенное значение в качестве регуляторов водного режима и местообитаний редких, промысловых водных и околоводных птиц, рыб, а также редких видов растений.

Регламентация хозяйственной деятельности в пределах водно-болотного угодья будет включать ограничения рубок, перемещений людей в теплый период года в гнездовых местообитаниях орланов, сухоноса, охотского улита, кулика-сороки и в местах миграционных остановок куликов, а также запрет на посещение части акватории в заливах и некоторых участках побережья. Большое значение имеют борьба с браконьерством, запрет охоты на водоплавающих птиц и куликов на приморских лугах, противопожарные мероприятия, регулирование численности бурого медведя (особенно на косах) для сохранения колоний камчатских крачек, птенцов охотского улита и кулика-сороки. Должен быть усилен контроль со стороны соответствующих органов за ведением рыбного промысла и соблюдением режима охраны на создаваемой особо охраняемой природной территории.

Многие туристические маршруты на Шантарские о-ва проходят вдоль берегов Ульбанского залива, где можно получить незабываемые впечатления от сохранившейся на его побережье первозданной природы, той самой, которую видели еще самые первые исследователи этой территории. ■

Работа выполнена при поддержке Русского географического общества (проект №04/2016-Р) и Амурского филиала Всемирного фонда дикой природы (грант №642/RU009604-16).

## Литература / References

1. Кулаков А.П. Морфотектоника и палеогеография материкового побережья Охотского и Японского морей в антропогене. М., 1980. [Kulakov A.P. Morfotektonika i paleogeografiya materikovogo poberezh'ya Okhotskogo i Yaponskogo morey v antropogene. Moscow, 1980. (In Russ.)]
2. Ионин А.С. Охотское море. Дальний Восток и берега морей, омывающих территорию СССР. М., 1982; 235–239. [Ionin A.S. Okhotskoye more. Dalniy Vostok i berega morey, omyvayushchikh territoriyu SSSR. Moscow, 1982; 235–239. (In Russ.)]
3. Петров Е.С., Новороцкий П.В., Ленишин В.Т. Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области. Владивосток; Хабаровск, 2000. [Petrov E.S., Novorotsky P.V., Lenshin V.T. Climate of Khabarovsk territory and Jewish autonomous region. Vladivostok, Khabarovsk, 2000. (In Russ.)]
4. Миддендорф А.Ф. Путешествие на север и восток Сибири. Ч.1: Север и восток Сибири в естественно-историческом отношении. СПб., 2004. [Middendorff A.F. Puteshestviye na sever i vostok Sibiri. Ch.1. Sever i vostok Sibiri v yestestvenno-istoricheskom otnoshenii. Saint-Petersburg, 2004. (In Russ.)]
5. Махинов А.Н., Иванов А.В. Гляциоморфолитогенез в устьях приливных рек юго-западной части Охотского моря. Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. Кн.2. Апатиты, 2001; 45–50. [Makhinov A.N., Ivanov A.V. Glacio-morpholito-genesis in the mouths of tidal rivers in the southwestern part of the Sea of Okhotsk. Sedimentological processes and evolution of the marine ecosystems in the conditions of marine periglacial. Apatity, 2001; 1: 45–50. (In Russ.)]
6. Алексеев М.Д., Онухов Ф.С., Уфимцев Г.Ф. Сброообвалы на северо-западном побережье Охотского моря. Геология и геофизика. 1975; 8: 87–95. [Alekseyev M.D., Onukhov F.S., Ufimtsev G.F. Sbrosoobvaly na severo-zapadnom poberezh'ye Okhotskogo morya. Geologiya i Geofizika. 1975; 8: 87–95. (In Russ.)]
7. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М., 2008. [Data List of Russian Federation (plants and fungi). Moscow, 2008. (In Russ.)]
8. Красная книга Хабаровского края: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и животных. Хабаровск, 2008. [Data List of the Khabarovsk Krai: Rare and endangered plant and animal species. Khabarovsk, 2008. (In Russ.)]
9. Прозоров Ю.С. Закономерности развития, классификация и использование болотных биогеоценозов. М., 1985. [Prozorov Y.S. Zakonomernosti razvitiya, klassifikatsiya i ispolzovaniye bolotnykh biogeotsenozov. Moscow, 1985. (In Russ.)]
10. Арчигов Е.И., Степанова Л.Е., Майоров И.С. Роль ледовых образований в развитии береговых геосистем Охотского моря. Владивосток, 1989. [Archikov Ye.I., Stepanova L.Ye., Mayorov I.S. Rol' ledovykh obrazovaniy v razvitiy beregovykh geosistem Okhotskogo morya. Moscow, 1989. (In Russ.)]

## Ulban gulf

A.N.Makhinov<sup>1,2</sup>, M.V.Kryukova<sup>1</sup>, V.V.Pronkevich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Aquatic and Ecological Problems, Far Eastern Branch of RAS (Khabarovsk, Russia)

<sup>2</sup> Pacific National University (Khabarovsk, Russia)

The results of complex geographic studies of one of the hard-to-reach areas of the coast of the Sea of Okhotsk are presented. The peculiarities of relief and exogenous processes, surface water, flora and fauna are considered. The role of tides and ice phenomena on the dynamics of the coasts and the structure of the channels of estuaries of rivers flowing into the bay is estimated. A significant landscape heterogeneity of the coast is established. The degree of biodiversity in various natural complexes and the state of rare species of plants and animals have been revealed. During the expedition work, the main risk factors for populations of rare and endangered bird species, both breeding and migrating in the investigated part of the Okhotsk Sea coast, were identified. The most significant negative impact is caused by fires that destroy significant areas of forests and seaside meadows. To preserve the unique landscapes of the coast of the Ulban Bay, rare species of plants and animals inhabiting it, it is recommended to create a specially protected territory of regional significance, within which it is necessary to limit economic activities.

**Key words:** Okhotsk sea, Ulban gulf, morphology of coasts, vegetation, animal world.

# Космическая диагностика климатической системы Земли

И.Н.Гансвинд

Научный геоинформационный центр РАН (Москва, Россия)

Постоянно увеличивающийся объем данных наблюдений Земли из космоса с помощью различных спутников дает возможность изучать климат и погоду на планете, сочетая сведения о динамике атмосферы, океана и льда, в целях прогнозирования климатических изменений. Климатическая и погодная системы зависят от температурных режимов океана и его взаимодействия с атмосферой. Глобальные наборы данных по океанической альтиметрии вкупе с распределениями температуры и солености по глубине позволяют строить топографию океана, которая демонстрирует повышение уровня Мирового океана, и выявлять общую циркуляцию вод. Надежным индикатором изменений служит состояние ледяного и снежного покровов. Как следует из спутниковых и наземных наблюдений, площадь ледников в Якутии (Восточная Сибирь) за последние 60 лет сократилась на 60%. Корреляции, установленные между свойствами аэрозолей и облачностью, стимулируют изучение влияния этих образований на энергетический баланс планеты и, следовательно, на ее климат.

Семь высокотехнологичных спутников летают в составе своеобразного поезда A-train, обеспечивая мониторинг состояния облаков, температуры атмосферы и земной поверхности, скорости ветра и давая основу для их совместного анализа. Последним в этой группировке стал спутник Orbiting Carbon Observatory-2, предназначенный для контроля концентрации важнейших парниковых газов. А спутники на низких околоземных орбитах ведут измерения с высокой точностью гравитационного и магнитного полей Земли.

Систематизация накопленного объема разнородных спутниковых данных, их усвоение в моделях и превращение в базы знаний позволит снизить уровень неопределенности в сценариях динамики климатической системы Земли.

**Ключевые слова:** динамика климата, глобальные спутниковые наблюдения, энергетический бюджет Земли, система атмосфера-океан-криосфера, спутниковые измерения гравитационного и магнитного поля.

После того как 60 лет назад был запущен первый искусственный спутник Земли (юбилей советского прорыва в космос отмечается в октябре), открылись новые возможности изучения нашей планеты с околоземных орбит. Параметры, определяемые со спутников в интересах наук о Земле, относятся к числу так называемых климатоформирующих. Стабильный тепловой режим на планете соответствует близости ее глобального энергетического баланса к равновесному. Океан и атмосфера переносят избыточную тепловую энергию, приходящую на верхнюю границу атмосферы в тропиках, в высокие широты. Получение данных об отдельных звеньях тепловой машины — атмосфере, океане, криосфере и связях между ними — основная задача космической диагностики Земли как системы. Результаты спутниковых измерений характеризуют взаимодействие атмосферы с приходящим солнечным излучением и собственным излучением



*Игорь Николаевич Гансвинд, старший научный сотрудник лаборатории систем космического мониторинга Научного геоинформационного центра РАН (Москва). Область научных интересов — системы управления и навигации космических летательных аппаратов.*

Земли, распределение в ней газов, создающих парниковый эффект, структуру облачности, роль аэрозолей.

Океан, занимающий большую часть поверхности Земли, оказывается самым инерционным звеном тепловой машины; его изменчивость существенно влияет на климат. Для спутникового мониторинга доступны данные об океанической топографии, температуре поверхности, солености вод, скорости и направлении ветра в приводном слое, параметрах поля волн (высоте, направлении и длине волны), цвете водной поверхности, цир-

куляции вод Мирового океана и изменении его уровня за время наблюдений, характере взаимодействия в системе «океан—атмосфера».

Спутниковые наблюдения позволяют получать данные о множестве образований криосферы — от ледяных облаков до горных пород с подземными льдами, оценивать состояние полярного ледяного щита, ледниковых покровов, возраст и сплоченность морских льдов, динамику промерзания—оттаивания почвы в зонах вечной мерзлоты. Влияние криосферы на Мировой океан проявляется в подъеме его уровня, связанного с таянием льда в Гренландии и Антарктиде, а также в распреснении и появлении слоя более легкой воды в районах формирования арктических глубинных вод.

Определяющее влияние на устойчивость климатической системы оказывают глобальный цикл углерода и гидрологический цикл. Факторы, на них влияющие, также подлежат спутниковой диагностике.

Важно отметить, однако, что одних только спутниковых данных недостаточно для их усвоения в моделях, необходимы наземные наблюдения, расширяющие и верифицирующие космические.

### Прогноз нуждается в информации для модели

Климатообразующие процессы на Земле диагностируются космическими средствами уже на протяжении нескольких десятилетий, причем возможности методов постоянно расширяются. Когда срок активного существования аппаратов истекает, наиболее многообещающие миссии возобновляются — запускаются новые спутники с усовершенствованными приборами при сохранении преемственности [1].

Спутниковые системы наблюдения производят сотни миллионов измерений различных параметров природных процессов в сутки. Огромный объем информации, накопленный за время глобального космического мониторинга Земли, требует структурирования, чтобы выявить системные связи и скрытые закономерности, отражающие многоаспектные взаимоотношения между разнородными измерениями, комплексное использование которых стало серьезной проблемой. Хотя факт изменения глобального климата к концу XX в. стал несомненным, оценки вкладов различных факторов в потепление климата, особенно количественные, вызывают споры. Наличие многолетних рядов непрерывавшихся наблюдений позволяет ранжировать природные процессы на временной шкале, находить амплитуды естественных колебаний теплового и динамического режимов на разных пространственно-временных масштабах и выделять на этом фоне вклад антропогенных факторов. Главная задача при этом — усвоение большого объема спутниковых данных в имеющихся

и новых моделях, причем не только генерация баз данных, но и выявление тенденций и создание экспертных систем (баз знаний).

Разумеется, реальные природные системы гораздо сложнее, чем их отображение в математических моделях. При моделировании выделяют те компоненты, которые, скорее всего, играют первостепенную роль, пренебрегая не столь существенными, а также трудно представимыми количественно. Далее, путем целого ряда предположений, объект заключается в рамки описания определенной математической теорией, которая должна предоставить эффективные методы расчетов на основе имеющегося массива экспериментальных данных.

Современные модели климата основаны на численном моделировании климатической системы как диссипативной динамической системы циркуляции атмосферы и океана. Энергия, питающая тепловые и динамические процессы в атмосфере, океане и на суше, поступает от Солнца. Приходящее солнечное излучение, поглощенное атмосферой и земной поверхностью, отраженное и рассеянное в космос, и собственное излучение Земли формируют глобальный энергетический бюджет планеты.

Наиболее совершенные модели с хорошей точностью воспроизводят основные черты атмосферной циркуляции. Вместе с тем практически всем им свойственны систематические ошибки в представлении климатической картины. К числу существенных трудностей численного моделирования относится задача учета процессов взаимодействия океана и атмосферы, источником неопределенностей остаются и биосферные процессы. В качестве основы для полной теории климата, которую еще предстоит создать, рассматриваются модели общей воздушно-водной циркуляции с учетом суши и морского льда. Но уже сегодня совместные модели циркуляции атмосферы и океана находят применение в качестве инструмента для сезонных прогнозов погоды.

Метеорологические прогнозы на срок от 30 сут до двух лет называются долгосрочными. Они представляют собой распределение вероятностей состояния атмосферы на период прогноза. Динамическая неустойчивость течений в атмосфере определяет ее внутреннюю изменчивость, по сравнению с которой более медленные вынуждающие воздействия рассматриваются как факторы, способные оказать влияние на систематические характеристики атмосферной циркуляции. К ним относятся аномалии температуры поверхности океанов, температура и влажность почвы, протяженность и толщина морского льда, состояние снежного покрова. Иначе говоря, атмосфера рассматривается как часть системы «атмосфера — деятельный слой подстилающей поверхности».

Итак, для моделей климата и метеорологического прогнозирования нужно знать параметры процессов взаимодействия излучения Солнца

и собственного излучения Земли с атмосферой. Мониторинг содержания в атмосфере парниковых газов и образований в ней (облачности, аэрозольных частиц) позволяет проводить прямые измерения рассеяния и ослабления света облаками и осадками, атмосферными аэрозолями, различать в облаках капельную влагу и частицы льда, определять тонкую структуру облаков, их водность и интенсивность осадков.

Характеристики системы «атмосфера—поверхность», необходимые для прогностических расчетов, поставляют, наряду с наземными станциями метеонаблюдений, полтора десятка космических спутников. Среди них выведенный в конце октября 2011 г. на полярную солнечно-синхронную орбиту спутник НАСА NPP (National Preparatory Project), переименованный впоследствии в SuomiNPP в честь Вернера Е.Суоми, отца спутниковой метеорологии. На борту спутника установлены пять приборов, обеспечивающих измерения температуры поверхности океана, суши, построение профилей температуры и влагосодержания атмосферы, а также зондирование образований в ней. Два радиометра предназначены для получения характеристик альbedo и радиационного баланса Земли.

Когда альbedo, или отражающая способность, возрастает, больше приходящей солнечной радиации возвращается в космос. Снижение альbedo приводит к увеличению нагрева. Изменение нагрева всего на 1% дает радиационный эффект 3.4 Вт/м<sup>2</sup>, сопоставимый по результату с удвоением содержания CO<sub>2</sub>. Как показали исследования с использованием измерений со спутников Terra, Aqua, SuomiNPP, отступление льдов в Северном Ледовитом океане значительно больше, чем ожидалось, уменьшает альbedo Земли. Между 1979 и 2011 г. альbedo Арктики уменьшилось с 52 до 48%. Снег и лед хорошо отражают свет [2], но, когда они тают, альbedo понижается. Леса имеют более низкое альbedo, чем открытое пространство, поэтому сведение лесов приводит к повышению отражения. Аэрозоли влияют на альbedo двояким образом. Прямое влияние состоит в отражении света в космос. Косвенный эффект заключается в том, что частицы аэрозолей служат центрами конденсации влаги и участвуют в формировании и динамике облачности. Облака же, с одной стороны, отражая солнечный свет, охлаждают Землю, а с другой — удерживая уходящее собственное тепловое излучение Земли, дают эффект нагрева.

Без привлечения спутников альbedo можно измерить с помощью так называемого пепельного света Луны. Это свет, сначала отраженный Землей, а затем посланный Луной обратно к Земле. В каждом наблюдении рассматривается примерно треть планеты, некоторые области остаются невидимыми. Подобные наблюдения выполняются в узком диапазоне длин волн 0.4–0.7 мкм и проводятся лишь изредка.

С запуском в феврале 2015 г. космического аппарата DSCOVR (Deep Space Climate Discovery) в интересах НАСА, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) и Военно-воздушных сил США измерения альbedo Земли перенесены в глубокий космос и ведутся на постоянной основе.

### Космический разведчик

Аппарат DSCOVR — эта климатическая обсерватория в дальнем космосе находится на орбите в окрестности точки Лагранжа 1 (L1), примерно в 1.5 млн км от нас на линии Земля—Солнце (рис.1), откуда можно увидеть всю освещенную светилосом планету от рассвета до заката с угловым размером от 0.45° до 0.53° (для сравнения: угловой размер наблюдаемой человеком полной Луны как раз равен 0.5°). Оси визирования приборов обсерватории, стабилизированной по всем трем осям, направлены на Солнце и на Землю одновременно. Что же измеряет эта аппаратура?

За нашим светилосом следит комплекс приборов PlasMag (Plasma Magnetometer), который предназначен для наблюдения солнечного ветра, состоящего в основном из протонов и электронов —

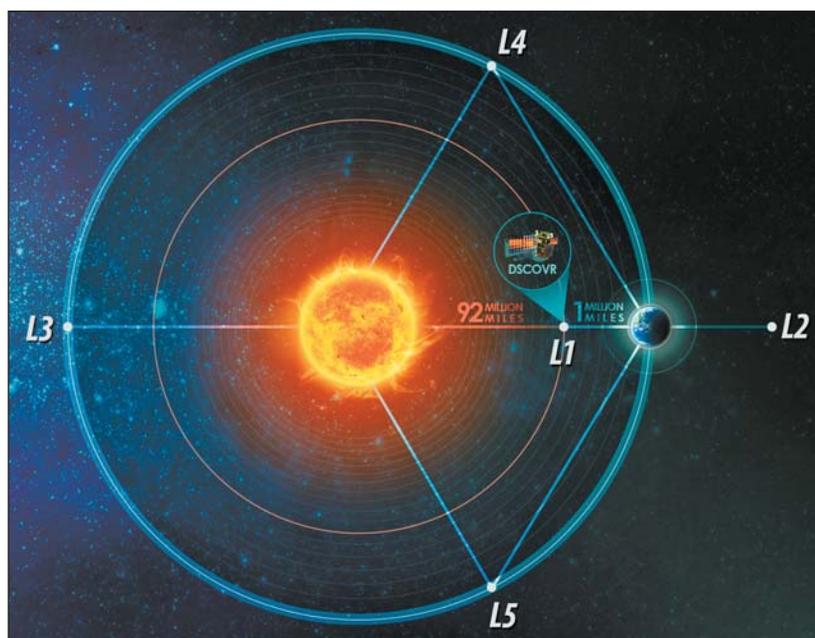


Рис.1. Климатическая обсерватория DSCOVR в точке Лагранжа L1.

непрерывного потока плазмы, распространяющегося от Солнца приблизительно в радиальных направлениях. Энергия магнитного поля, накопленная в активных областях Солнца, расходуется на ускорение миллиардов тонн вещества корональных выбросов, уносящего в межпланетную среду «вмороженное» магнитное поле.

PlasMag состоит из трех частей: векторного магнитометра, детектора положительно заряженных ионов и спектрометра электронов. Измерения в точке L1 позволяют следить за «космической погодой», исследовать влияние солнечных событий на земные процессы, обнаруживать опасные для наземной инфраструктуры корональные выбросы, получать их характеристики, чтобы за 15–60 мин предупредить об опасности для уязвимых объектов на Земле и в околоземном пространстве.

Солнечное излучение, проходя через атмосферу, взаимодействует с ней и с поверхностью Земли в процессах поглощения, отражения и рассеяния, которые происходят на взвешенных частицах — аэрозолях — и на молекулах. Коэффициенты рассеяния на молекулах очень быстро убывают с ростом длины волны; существенное значение имеет зависимость от частоты и коэффициента молекулярного поглощения. Процессы с участием аэрозольных частиц «завязаны» на частоту в меньшей степени. Величина оптической толщины атмосферы в красной части спектра заметно меньше, чем в фиолетовой. Ее зависимость от длины волны позволяет судить о соотношении между молекулярной и аэрозольной составляющими атмосферы.

Оптические характеристики атмосферы Земли изучаются с помощью ориентированного на нее комплекса NISTAR (National Institute of Standards & Technology absolute Radiometer), состоящего из трех полостных радиометров — полного (интегрального по спектру), отраженного и собственного излучения, усредненного по освещенному полушарию:

- в канале 0.2–100 мкм устанавливается суммарная мощность излучения в ультрафиолетовом, видимом и дальнем инфракрасном диапазонах;
- в канале 0.2–4 мкм контролируется отраженное солнечное излучение от УФ до ближнего ИК;
- в канале 0.7–4 мкм регистрируется тепловое излучение Земли.

Радиометр измеряет плотность потока излучения освещенной Солнцем поверхности Земли, чтобы уточнить энергетический бюджет планеты. Зная полную энергию, выходящую через внешнюю границу атмосферы, и освещенность внешней границы атмосферы солнечным излучением, получим альбедо Земли как отношение этих величин.

Видовая полихроматическая камера EPIC (The Earth Polychromatic Imaging Camera) формирует изображения Земли в десятках узких спектральных каналов от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного. Изображения сразу всей освещенной



Рис.2. Вид освещенной стороны Земли по наблюдениям полихроматической камеры обсерватории DSCOVR.

щенной части планеты (рис.2) позволяют наблюдать глобальные характеристики облачного покрова, распределение аэрозолей, толщину озонового слоя, вегетационные характеристики растительности, перемещения масс пыли и вулканического пепла.

На множестве изображений были неожиданно обнаружены яркие световые отблески как над океаном, так и над сушей. За время с июня 2015 г. исследователи зафиксировали и изучили [3] 866 вспышек и снабдили каждую данными о географической широте, углах рассеяния света и другой относящейся к делу информацией. Выяснилось, что вспышки над сушей обусловлены отражением света от тонких кристаллов льда в облаках, находящихся в горизонтальном положении. Обнаружение из глубокого космоса тропосферного льда можно использовать для вероятностной оценки содержания в атмосфере ориентированных ледяных кристаллов и их вклада в альбедо. Ранее горизонтально ориентированные кристаллы льда в облаках были отмечены по данным спутника с лидаром CALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation). Лидар с твердотельным лазером излучает короткие импульсы с высокой частотой в узком луче. Наблюдается сигнал обратного рассеяния фотонов: возвращается порядка 12% фотонов от молекулярного рассеяния на аэрозолях. По величине сигнала и его поляризации можно определить верхнюю границу облаков, водной и ледяной фаз в них, характеристики аэрозоля в стратосфере, концентрации газов.

В радиодиапазоне излучение с длинами волн больше 1 см проходит через облачный покров (закрывающий в среднем 55% земной поверхности) и позволяет наблюдать внутриоблачные процессы, а также процессы в пространстве между облаками и поверхностью Земли; по оптическим

и ИК-каналам такие наблюдения невозможны, поскольку они относятся лишь к верхнему слою облаков (от десятков до сотни метров). В радиодиапазоне наблюдаемую интенсивность излучения при данной длине волны характеризуют радиояркостью температурой. Современные ИК- и СВЧ-радиометры регистрируют собственное излучение суши, поверхности Мирового океана и атмосферы. На базе многолетних СВЧ- и ИК-радиометрических спутниковых наблюдений разработаны методы их использования для оценки теплового и динамического взаимодействия в системе «океан—атмосфера». Спутниковые данные позволяют установить общее влагосодержание атмосферы, среднемесячные значения которого коррелируют со среднемесячными значениями влажности и температуры приводного воздуха и в сочетании с измерениями температуры поверхности океана характеризуют потоки влаги и тепла в контактном слое океана и атмосферы [4]. Были использованы данные СВЧ-радиометрических приборов SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager), установленных на американских космических аппаратах серии DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) за период 1988–1998 гг.

В декабре 2001 г. на полярную солнечно-синхронную орбиту был выведен «Метеор-3М», первый из российской серии спутник, оснащенный многоканальным температурно-влажностным зондировщиком атмосферы МТВЗА, возможности которого сочетают функции трех СВЧ-радиометров спутников DMSP: SSM/I, SSM/T, SSM/T2. На космическом аппарате «Метеор-3М» №2 установлены оптико-микроволновой сканер МТВЗА-ОК (его уникальная особенность — совмещенное синхронное сканирование оптического блока с семью каналами, включая тепловой ИК- и СВЧ-блоки).

По спутниковым данным на интервале 2004–2015 гг. разработаны сетевые сервисы геопортала глобального радиотеплового поля системы «океан—атмосфера» [5].

## Океанические высоты

Перенос энергии океаном от низких широт к высоким осуществляется потоком теплых вод в поверхностных слоях, тогда как потоки холодных и соленых вод у дна океана направлены к экватору. Отдельные бассейны Мирового океана различаются по температуре и солености, что вызывает межконтинентальную циркуляцию, играющую значительную роль в тепловой машине Земли. Поэтому первостепенное значение в наблюдениях климата имеет глобальная система мониторинга Мирового океана. Сочетая спутниковые и прямые средства, она служит как фундаментальным научным, так и прикладным целям.

В январе 2016 г. была выведена на орбиту уже четвертая с 1992 г. океанографическая станция

для точных измерений высоты поверхности океана — Jason-3, продолжающая международную кооперацию NOAA (США) и EUMETSAT (European Organization for the Exploration of Meteorological Satellites). Сейчас она работает в паре с Jason-2, которая с 2008 г. успешно измеряет высоту водной поверхности относительно земного эллипсоида, принятого в навигационной модели спутников. Индийско-французский спутник SARAL с 2013 г. предоставляет данные о расстоянии до поверхности океана с погрешностью 8 мм. Дальнейшие измерения будут проводиться серией спутников Sentinel-3 Европейского космического агентства (ESA), первый из них был запущен в феврале 2016 г., а следующий планируется вывести на орбиту в 2021 г. Метод измерения высоты спутника над водной поверхностью с помощью импульсного высотомера требует точного знания относительного положения спутника, для чего нужны точные траекторные определения и измерения времени прохождения сигнала до поверхности океана и обратно.

Волнение усредняется за счет того, что площадь, освещаемая радиолокационным дальномером, имеет диаметр в несколько километров. Траекторные измерения орбиты спутника и его положения на орбите позволяют вычислить текущее расстояние до центра Земли. Разность двух величин дает расстояние от центра Земли до водной поверхности в подспутниковой точке. Несмотря на неопределенности модели (постоянно совершенствуемой на основании данных спутниковых измерений гравитационного поля Земли — об этом речь пойдет дальше), использование накопленных многолетних данных о распределении температуры и солености морской воды по глубине позволяет восстанавливать топографию океана по альтиметрическим измерениям отклонений высоты поверхности моря от средних ее значений вдоль трассы спутника [6].

Существенным дополнением к дистанционным спутниковым наблюдениям служит всемирная сеть океанографических станций АРГО, состоящая из 3000 дрейфующих ныряющих буев, измерителей температуры и солености морской воды на разных горизонтах. Это глобальный научный проект международного общества океанологов с участием 50 организаций из 26 стран.

Масштабная наблюдательная система спутниковой альтиметрии и зондирующих буев АРГО — основа исследований пространственно-временной изменчивости уровня моря, циркуляции вод в Мировом океане, переноса тепла, накопленного водой, призванная решать следующие задачи:

- изучить структуру вод Мирового океана и ее изменчивость;
- уточнить характер циркуляции вод в Мировом океане;
- выяснить роль Мирового океана в климатической системе.

Океаническая топография заставила пересмотреть представления об океаническом волнении, характере динамических процессов на всех пространственно-временных масштабах — вихрей, фронтов, апвеллингов, волновых процессов (волн Россби, волн Кельвина), явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Дистанционные наблюдения поверхности моря, прежде всего спутниковая альтиметрия, вместе с данными зондирующих буев служат источниками информации для расчетов по соответствующей модели, предоставляющих оперативную картину изменчивости океана.

## Ледяной SOS

Спутниковые данные о динамике природных систем, состоящих из снега и льда, дают прямые свидетельства изменений окружающей среды. Изучение процессов в криосфере как комплексного индикатора изменений природной среды — один из приоритетов наук о Земле. Площадь льдов, покрывающих Арктику, уменьшилась за 1979–2011 гг. на 40%. По данным Института мерзлотоведения СО РАН, высота горных ледников Якутии сократилась за последние 60 лет на 70%, а их площадь съезжилась почти на 40% [7]. Одно из самых холодных мест Северного полушария — север Янского плоскогорья в Якутии с сухим и резко континентальным климатом. И тем не менее в 1967–2010 гг. здесь более чем на 1° увеличилась средняя летняя температура воздуха, а средняя зимняя возросла еще сильнее, на 2 с лишним градуса. Увеличилось поступление летних атмосферных осадков и сократилось поступление зимних. Изменение климата вызвало усиление термоденудации — криогенного разрушения горных пород с переносом продуктов разрушения в пониженные участки. В Верхоянском уезде вблизи р. Батагайки образовался гигантский термокарстовый котел с километр в длину и глубину 100 м. Динамика развития форм разрушения льдистых пород прослеживается на спутниковых снимках начиная с 1968 г. У «Батагайского чуда» найден и палеоботанический аспект: при оттаивании вечной мерзлоты обнаружались останки древнейших животных и древнейших растений. Из ископаемых семян возрастом 32 тыс. лет удалось прорастить способные к цветению и размножению растения [8]. Отсутствие льдов в Северном Ледовитом океане существенно уменьшает альбедо Арктики: с 1979 по 2011 г. его значение уменьши-

лось с 52 до 48%. Космический аппарат ICESat-1 (Ice Cloud and Land Elevation Satellite) в системе наблюдения Земли НАСА, используя лазерные технологии, проводил измерения высоты ледяного щита в течение семи лет (до 2010 г.). На 2018 г. планируется запуск аппарата ICESat-2. Сравнение с данными, полученными ранее, позволит оценить динамику границ и объема ледовых щитов Гренландии и Антарктиды за 15-летний период и выявить тенденции изменения толщины морского льда.

Заметное изменение условий взаимодействия в системе «воздух—вода—лед» влияет на характеристики поля волнения в прибрежных морях, эрозию берегов, условия судоходства и вместе с тем на проектные требования к судам и добывающим платформам.

Понижение альбедо подстилающей поверхности, обусловленное таянием морского, ледяного и снежного покрова, а также ледников на суше приводит к усилению потепления в Арктике за счет обратной связи: чем меньше отражение, тем большая часть солнечного излучения поглощается поверхностью, что усиливает таяние и провоцирует дальнейшее падение альбедо.

Вклад в подъем уровня Мирового океана от таяния льда в Гренландии и Антарктиде с большой неопределенностью оценивается в 0,35 мм/год (что составляет 10% наблюдаемой среднегодовой скорости подъема океанического уровня), точность оценок существенно возросла благодаря спутниковым измерениям вариаций гравитационного поля Земли (об этом чуть ниже), а также дистанционным наблюдениям за изменениями высоты поверхности ледового покрова (рис.3). Основная часть подъема уровня океана приходится на тепловое расширение воды. Прямые измере-

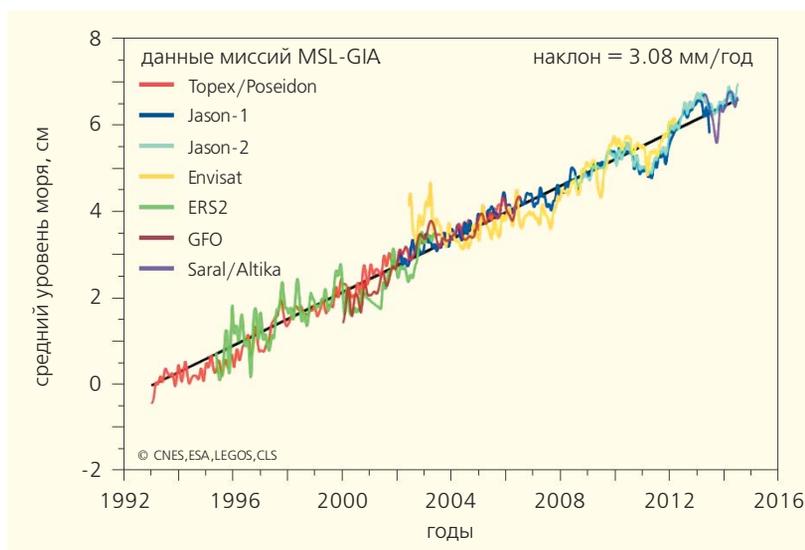


Рис.3. Подъем уровня Мирового океана за период спутниковых измерений высоты поверхности моря.

ния повышения температуры океана на глубине до 2000 м объясняют около 32% наблюдаемой среднегодовой скорости подъема океанического уровня. Незатронутыми потеплением климата остаются глубины океана (в силу огромной тепловой инерции и отсутствия сильных течений).

Вообще изучение влажности почвы и ее замерзания—оттаивания в глобальном масштабе — важнейшее направление исследования Земли. В 2010 г. влажность почвы была признана существенной климатообразующей переменной. Влагоддержание почвы — характеристика водообмена между атмосферой, почвой и грунтовыми водами — один из определяющих факторов круговорота воды в природе. Мониторинг распределения влаги в почве дистанционными методами с использованием радиометрических измерений в СВЧ- и ИК-диапазонах ведет начало с октября 1978 г., обеспечивая регулярное поступление сравнительно однородных данных, которые помимо научных применений в моделях климата используются на практике для прогнозов наводнений и засух, а также урожайности сельскохозяйственных культур. На измеряемую с помощью СВЧ-радиометра излучательную способность суши или водной поверхности одинаково влияют и влажность почвы, и соленость вод океана, что позволяет по данным измерений периодически формировать как карты полей солености, так и карты влажности почвы. Соленость поверхностного слоя океана наряду с температурой определяет плотность воды и сказывается на глубине циркуляции и меридиональном переносе тепла. Поля солености, их сезонная и межгодовая изменчивость, — один из факторов, влияющих на поглощение и выделение двуокиси углерода и тем самым контролирующим цикл углерода в океанических районах Земли. И следовательно, они имеют прямое отношение к глобальному потеплению.

Свидетельства изменений земного климата в прошлом столетии и последних десятилетиях, как известно, вызывают обеспокоенность политиков, экономистов, экологов из-за возможных неблагоприятных последствий для окружающей среды и устойчивого развития. Потепление объясняют существенным возрастанием концентрации в атмосфере парниковых газов (прежде всего углекислого газа и метана), поглощающих тепловое излучение земной поверхности в ИК-интервале. Стратегия, предлагаемая Киотским протоколом, предусматривает ограничение промышленных выбросов углекислого газа [9].

На смену Киотскому протоколу пришло Парижское соглашение по климату, принятое 12 декабря 2015 г. по итогам 21-й конференции Рамочной конвенции об изменении климата (РКИК, 1992 г.) в Париже. Делегации со всего мира пришли к соглашению, что для предотвращения необратимых последствий для экологии человечеству необходимо удержать рост средней темпера-

туры на планете в пределах 1.5–2° по отношению к соответствующему показателю доиндустриальной эпохи.

В 2015 г. было зафиксировано превышение средней температуры планеты более чем на 1°C по сравнению с XIX в., когда начались наблюдения за изменением температуры.

Регулярные наблюдения уровня концентрации атмосферного диоксида углерода, начатые в 1958 г. Ч.Киллингом в обсерватории на Гавайях, производятся сейчас на 150 с лишним станциях по всему миру.

Установлено, что с начала индустриальной эры содержание CO<sub>2</sub> увеличилось более чем на 40% — с приблизительно 280 на миллион частей в объеме до примерно 400. Другими словами, сегодня 400 штук из каждого миллиона молекул воздуха — молекулы углекислого газа. Половина этого роста ведет начало с 1980 г., четверть приходится на период после 2001 г., до этого климатическая система находилась в относительно узком диапазоне изменения температуры и концентрации парниковых газов. Современное содержание CO<sub>2</sub> возрастает более чем на 0.5% ежегодно. Чтобы объяснить такой рост, достаточно менее половины из 36 млрд т CO<sub>2</sub>, поступающих ежегодно в атмосферу в результате использования ископаемого топлива и других видов человеческой деятельности. Оставшаяся половина поглощается в природе: около четверти — океаном, другая четверть — биосферой суши. Природные поглотители ограничивают скорость поступления CO<sub>2</sub> в атмосферу. Однако процессы, контролирующие «стоки» диоксида углерода, мало изучены, наземные измерения не могут с необходимой точностью охватить большую часть земной поверхности. Вопрос о динамике CO<sub>2</sub> в атмосфере остается основным в проблеме глобального потепления и оценке вклада человеческой деятельности в изменения климата.

2 июля 2014 г. был выведен на солнечно-синхронную орбиту с периодом повторения трасс 16 сут космический аппарат OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory). Эта миссия НАСА, предназначенная для изучения CO<sub>2</sub> в атмосфере, позволит получить по возможности полную картину природных и технических источников углекислого газа и мест, где он покидает атмосферу. От измерительной аппаратуры космического аппарата требуется высокая точность, поскольку концентрация углекислого газа в атмосфере в региональном и континентальном масштабе меняется менее чем на 2%, а локальные вариации могут составлять и треть процента.

На борту OCO-2 установлен комплекс из трех соосных одноцелевых спектрометров с дифракционной решеткой. Оптическая схема позволяет формировать изображения в трех узких полосах спектра. Полоса слабого поглощения CO<sub>2</sub> (1.61 мкм) наиболее чувствительна к его концентрации вблизи поверхности Земли. Канал погло-

щения молекул кислорода (0.765 мкм) является контрольным, поскольку молекулярный кислород равномерно распределен в атмосфере с хорошо известной концентрацией. Спектры в линии кислорода 2.06 мкм служат еще одному способу определения концентрации  $\text{CO}_2$ . Кроме того, последний канал чувствителен к присутствию аэрозолей и изменению влажности вдоль оптического пути.

Свет, попадающий в объективы спектрометров, проходит через атмосферу дважды: сначала достигая поверхности Земли, а затем отразившись от нее (рис.4). Углекислый газ и молекулярный кислород поглощают свет в своих узких полосах, и получаемые изображения могут изменяться от светлых до самых темных с малыми градиентами, в зависимости от обилия этих газов на оптическом пути.

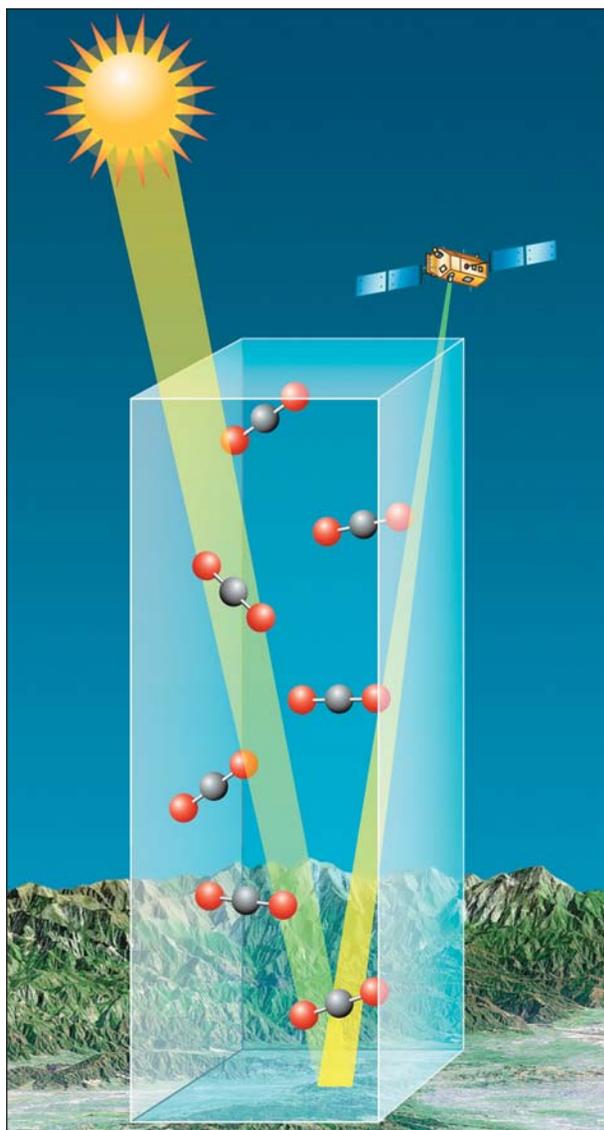


Рис.4. Орбитальная обсерватория ОСО-2, картирующая глобальное распределение углекислого газа в атмосфере Земли с источниками и стоками.

Кроме «фотоохоты» на углекислый газ эта обсерватория, наблюдая солнечно-индуцированную флуоресценцию, связанную с фотосинтезом, отслеживает сезонные изменения поглощения  $\text{CO}_2$  растениями. Целевая аппаратура ОСО-2 ежедневно проводит почти 100 тыс. измерений глобального охвата. Обработку данных, построение карт и 3D-изображений динамики  $\text{CO}_2$  в атмосфере выполняет Подразделение глобального моделирования и усвоения данных НАСА в Годдардовском космическом центре (г.Гринблат, штат Мэриленд) по программе с привлечением наземных наблюдений. Районы с наибольшим содержанием  $\text{CO}_2$  в атмосфере — Восточный Китай, восток США, Центральная Европа и Средний Восток. Аппаратура ОСО-2 позволяет различать отдельные источники диоксида углерода (такие, как города), отслеживать сезонные вариации его содержания и перенос в атмосфере [10].

### Аэрозольный зонтик

Значительное влияние на климат оказывает атмосферный аэрозоль. Частицы радиусом  $10^{-7}$ – $10^{-2}$  см присутствуют в атмосфере на всех высотах. Аэрозоль естественного происхождения попадает в атмосферу с поверхности суши и океана, а также образуется в химических реакциях между газами в атмосфере. Частицы антропогенного происхождения в основном появляются как продукты горения лесов и сжигания ископаемых топлив, но отчасти возникают и в результате изменения земных покровов.

Частицы аэрозоля поглощают и отражают солнечную радиацию главным образом в диапазоне 0.4–4 мкм, изменяя альбедо в системе «поверхность Земли — атмосфера». Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие оказывается противоположным парниковому эффекту. Косвенное влияние аэрозоля проявляется через возрастание оптической толщины и альбедо облаков в результате уменьшения размеров и роста счетной концентрации мелких облачных капель при той же водности облаков — за счет действия частиц аэрозоля как облачных ядер концентрации. Иначе говоря, взаимодействие аэрозоля и облаков также частично компенсирует парниковый эффект. Поэтому исследование поведения атмосферных частиц особенно важно.

На характеристики стратосферного аэрозоля на высотах 15–25 км влияют постоянно поступающие из тропосферы различные сернистые соединения, которые образуются при сжигании горючих ископаемых и выбрасываются при извержении вулканов. Двуокись серы в фотохимических реакциях окисляется до трехоксида, и в условиях влажности в атмосфере образуются капли раствора серной кислоты высокой концентрации радиусом 0.03 мкм. Аэрозольный слой такого рода заметно ослабляет солнечное излучение. На Зем-

ле около 2 тыс. действующих вулканов. Мощные вулканические извержения середины VI в. породили в Северном полушарии малый ледниковый период в Средневековье — 120-летнее похолодание VI–VII вв., которое было усилено и затянато сопутствующим ростом ледников и морского льда в высоких широтах. Неурожаи, голод, эпидемии и неизбежные тогда войны сократили население Европы на многие десятки миллионов людей.

В наше время извержение вулкана Пинатубо на Филиппинском острове Лусон 10–15 июня 1991 г. вызвало выброс около  $10 \text{ м}^3$  горных пород, самый мощный (по шкале вулканических извержений) с момента извержения вулкана Кракатау в 1883 г. Высота эруптивной колонны достигала 34 км. В стратосферу поступило огромное количество вулканического пепла и газов, и на протяжении нескольких месяцев наблюдался глобальный слой сернокислого тумана. Однако при этом было зарегистрировано снижение средней температуры на планете лишь на  $0.5^\circ\text{C}$  и некоторое сокращение озонового слоя.

Характеристики сложных процессов, в которых участвуют излучение Солнца, водяной пар, облачность, аэрозольные частицы, газовые примеси в атмосфере, изучаются измерительными средствами, распределенными между семью спутниками (рис.5). Последние расположены на орбитах с почти одинаковыми параметрами и пролетают над одной и той же точкой земной поверхности с интервалом в несколько минут. Группировка

спутников A-train на солнечно-синхронной орбите высотой 700 км, которая начала создаваться с 2002 г., пополняется спутниками с аппаратурой, обладающей новыми функциями или более совершенной. В 2012 г. в состав «дневного орбитального поезда» вошел японский спутник GCOM-W1 (Global Change Observation Mission — Water 1<sup>st</sup>) с микроволновым сканирующим радиометром AMSR-2 на борту, усовершенствованным вариантом радиометра AMSR-E, который длительное время служит на спутнике Aqua (с него началось создание «поезда»). Данные измерений позволяют восстанавливать паросодержание атмосферы, водозапас облаков, скорость приводного ветра и температуру поверхности океана [11]. В состав группировки A-train в июле 2014 г. вошла и орбитальная углеродная обсерватория OCO-2. С помощью трехканального дифракционного спектрометра предполагается с достаточной точностью оценить распределение источников и стоков углекислого газа на Земле, уточнить представления о цикле углерода и роли в нем природных и антропогенных процессов.

Французский спутник Parasol работает в составе группировки с 2004 г., располагая радиометром-поляриметром. Поляризационные характеристики позволяют определять оптическую толщину атмосферы, распределение облаков, изучать аэрозольный цикл в тропосфере, спектральные характеристики аэрозолей и их распределение над сушей и над морем.

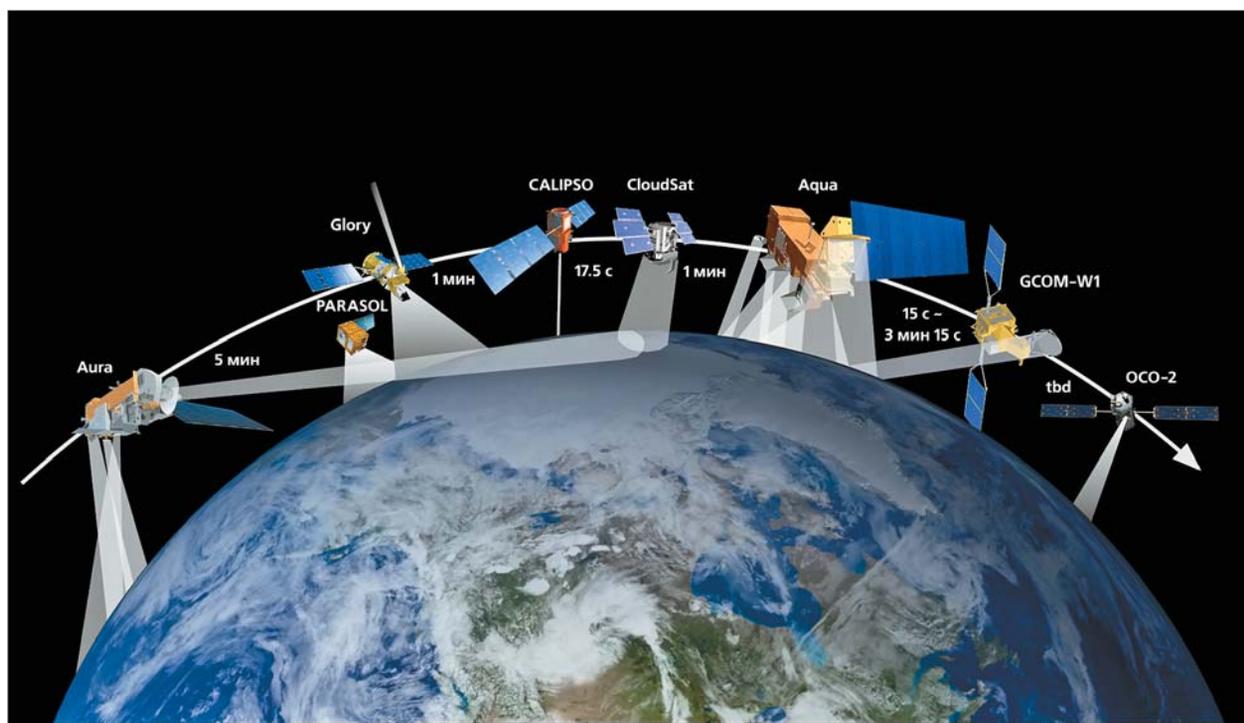


Рис.5. Группировка из семи спутников A-train для получения климатоформирующих данных в одном пространственно-временном окне.

Спутники CALIPSO (Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) и CloudSat, вместе вошедшие в состав группировки в 2006 г., оснащены разными инструментальными средствами для получения трехмерных изображений облаков и аэрозолей. На американском CloudSat установлен радар с миллиметровой длиной волны, что позволяет различать в облаках частицы воды и льда меньшего размера по сравнению с радарами сантиметрового диапазона. За американским, не отставая более чем на 15 с, следует французский, основным инструментом которого служит лидар с ортогональной поляризацией (лидар аналогичен радару, но разница между ними состоит в том, что наблюдается сигнал обратного рассеяния, а не отражения). По величине сигнала обратного рассеяния и его поляризации, напомним, возможно восстановление физических характеристик атмосферы, определение верхней границы облаков, водной и ледяной фаз в них, оптической плотности, концентрации газов в тропосфере, характеристик стратосферного аэрозоля на высотах 15–25 км. Лидарное зондирование позволяет измерить эффективный радиус облачных капель.

### Земные поля: гравитационное...

Рассказывая о дистанционном зондировании, нельзя обойти высокоточные измерения параметров гравитационного и магнитного полей Земли. Спутники на низких околополярных орбитах служат идеальной платформой для этих задач.

Эллипсоидальная форма Земли уже упоминалась — так называемый геоид, ограниченный поверхностью Мирового океана в состоянии покоя и равновесия (продолженной под материками), близок к эллипсоиду, сплюснутому у полюсов и растянутому в экваториальной зоне. От геоида отсчитывается геодезическая высота земной поверхности над уровнем моря. Но массы распределены на поверхности и в недрах неравномерно, земная кора неоднородна, что проявляется в вариациях и аномалиях гравитационного поля. Прогресс в области методов изучения гравитационного поля способствовал созданию новых моделей с улучшенными характеристиками по точности и детальности и позволил довести точность определения параметров геоида до 1–2 см. Новые модели геоида показывают, что сила тяжести на разных территориях планеты существенно варьирует. Область с самой низкой силой тяжести — Южная Индия, слабое гравитационное поле наблюдается в Североамериканском регионе. Наибольшая сила тяжести фиксируется на западе Южной Америки, в районе Кордильер, и в Австралии. Эти вариации отражают различия масс и плотностей вещества недр.

Крупными перераспределениями масс сопровождаются многие процессы на планете — прилив-

ные, гидрологические, гляциологические (в том числе течения и изменение уровня океана); дают свой вклад также тектоника плит, течения в мантии и во внешнем ядре.

Пространственные и временные вариации гравитационного поля вызваны крупномасштабными изменениями распределения масс на Земле, связанными в значительной мере с круговоротом воды, в ходе которого океан, атмосфера, суша и криосфера обмениваются запасами влаги во временных масштабах от суточных, сезонных, годовых и десятилетних. Эти подвижки масс можно соотнести с такими процессами, как сокращение ледового покрова суши, подъем уровня Мирового океана, обширные засухи и наводнения.

Мониторинг гравитационного поля Земли спутниками на возможно более низких орбитах с глобальным покрытием поверхности проводится с середины 2000 г. В марте 2002 г. с космодрома Плесецк были выведены на околополярную орбиту спутники-близнецы миссии GRACE-1, в разработке которых кроме НАСА участвовал Немецкий аэрокосмический центр DLR\*.

Суть подобного исследования была бы ясна еще королевскому астроному Великобритании преподобному Невилу Маскелайну. В 1772 г. в докладе Королевскому обществу он утверждал: «Если бы тяготение проявлялось так, как полагает сэръ Исаак Ньютон, действуя не только между большими телами Вселенной, но и между мельчайшими частицами, из которых они состоят, то с необходимостью следовало бы, что каждая возвышенность должна своим притяжением изменять направление силы тяготения тяжелых тел, расположенных поблизости».

Одинаковые аппараты следуют один за другим на расстоянии около 200 км, изменяющимся под влиянием вариации силы тяжести. Дальномерные измерения с точностью не хуже 10 мкм позволили за 30 сут выполнять глобальный обзор гравитационного поля Земли. Высота орбиты за счет торможения в атмосфере уменьшилась за 14 лет с 500 до 360 км, солнечные батареи за это время заметно деградировали. На смену, предположительно в августе 2017 г., придет миссия GRACE-FO с аппаратурой, дополненной лазерными измерениями взаимного расстояния между спутниками, поскольку только долговременные наблюдения могут дать надежную информацию о климатических тенденциях.

Измерения гравитационного поля Земли на новой инструментальной основе были продолжены со спутника Европейского космического агентства GOCE (Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer) с корпусом типа «аэродинамическая стрела», статически устойчивым

\* Подробнее о миссии GRACE-1 см.: Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Шам С.К. Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России // Природа. 2016. №5. С.3–8.



Рис.6. Спутник GOCE для проведения высокоточных измерений гравитационного поля Земли с самой низкой орбиты.

в разреженной атмосфере на низкой орбите — 260–229 км (рис.6). Его ионные двигатели компенсировали негравитационные силы (аэродинамическое торможение и солнечное давление). Выведенный на орбиту с космодрома Плесецк в марте 2009 г. спутник проработал четыре года до исчерпания запаса ксенона, питавшего ионные двигатели. Новые измерения с пространственным разрешением 100 км и использование особо точных акселерометров позволили усовершенствовать модели гравитационного поля [12].

Дешифрирование связей вариаций гравитационного поля, измеренных спутниками GRACE-FO, с перераспределением водных масс на суше существенно упростится с запуском в 2020 г. спутника SWOT (Surface Water and Ocean Topography), предназначенного для получения данных о динамике пресной воды в озерах, водохранилищах и реках путем измерения высоты стояния воды с погрешностью не более 1 см с помощью канадской радарной системы. Миссия SWOT — совместный проект канадского, американского и французского космических агентств.

Большие перспективы открываются перед использованием спутниковых измерений гравитационного поля в сочетании с сейсмической томографией, в которой регистрируются сейсмические волны. Вариации скорости их распространения от источника землетрясения в недрах Земли зависят от температуры и состава горных пород, но не несут информации о массе. Совместное использование структурной информации, поставляемой сейсмической томографией, и гравитационных данных, чувствительных к массе, позволит исследовать потоки в мантии с учетом плавучести материала.

Высокоточные измерения гравитационного поля представляют интерес для широкого круга задач физики Земли, геодезии, геологии, геодинамики, океанологии и находят применение в прикладных задачах построения геоида регионального уровня для оценки материальных ресурсов, поиска областей с высоким геотермальным потенциалом, повышения точности определения орбит космических аппаратов, спутниковой альтиметрии, оптических и глобальных навигационных систем.

### ... и магнитное

Данные о состоянии магнитного поля Земли (МПЗ) зачастую приводят в метеорологических прогнозах, поскольку его возмущения сказываются на самочувствии многих людей, но для ученых их информативность гораздо шире.

Тело Земли — это тонкая кора, объемная мантия и ядро размером примерно с Марс. Треть массы планеты содержится в ядре, остальные две трети — в мантии и коре. Измерения гравитационного и магнитного полей Земли с низкоорбитальных спутников предоставляют данные, связывающие движения масс во внешнем ядре с вариациями гравитационного поля и изменением магнитного поля. Длительные наблюдения изменений МПЗ на интервалах от года до десятков лет наряду с пространственно-временными вариациями гравитационного поля позволят проникнуть в механизмы, порождающие самоподдерживающееся магнитное поле.

Магнитные поля, измеряемые спутниками на низких околоземных орбитах, суммируют вклады от трех источников:

- от геодинamo в земном ядре (главное поле);
- от намагниченных горных пород коры (корые литосферные поля);
- от электрических токов в ионосфере и магнитосфере (внешние поля).

Главное поле создает и поддерживает в некотором роде динамомашину, движимая, по-видимому, тепловыми процессами в проводящей жидкости внешнего ядра, граничащего с твердым, очень плотным внутренним ядром из металлического железа. Вариации главного поля связаны с динамикой потоков вещества в жидком ядре, находящихся под влиянием силы Кориолиса (она искривляет потоки, переносящие тепло), а также с переменной плавучестью материала. Изучение намагниченности коры несет информацию о тер-

мическом состоянии литосферы и о составе горных пород. С удалением от поверхности Земли ее собственное магнитное поле быстро падает и на расстояниях в десятки тысяч километров оказывается сравнимым с межпланетным. Взаимодействие солнечного ветра и магнитного поля Земли создает магнитосферу планеты, конфигурация которой поддерживается электрическими токами, текущими по ее границам, и управляется солнечной активностью. Магнитное поле внешних источников, в отличие от поля внутренних, изменяется на короткой временной шкале. Чтобы быть уверенным в точности оценок вклада главного и литосферного полей, необходимо тщательно измерять внешнее поле. Даже в магнитоспокойные дни в ионосфере существуют значительные электрические токи. Основная задача анализа измерений — разделить вклады в МПЗ от ядра Земли, мантии, коры, океана, ионосферы, магнитосферы.

Считается, что МПЗ существует более 3 млрд лет и, защищая Землю от заряженных частиц солнечного ветра, служит одним из основных факторов в геологической истории планеты и в эволюции жизни. На протяжении всего этого времени МПЗ не было стабильным и регулярным — северный и южный полюса магнитного диполя спонтанно менялись местами. За последние 150 млн лет инверсия полюсов происходила сотни раз, о чем свидетельствуют изверженные горные породы, сохраняющие с момента своего остывания намагниченность, направление и величина которой соответствуют магнитному полю своей эпохи. В океанической коре записаны все изменения МПЗ за 180 млн лет. Промежуток времени между переменной полюсов составляет в среднем 250 тыс. лет, а сам процесс исчезновения прежней полярности и возникновения новой занимает от четырех до десяти тысяч лет. Этому процессу предшествует ослабление напряженности поля, но за ослаблением не всегда следует инверсия. Так, за последние 780 тыс. лет магнитные полюса местами не менялись.

С тридцатых годов XIX в. напряженность геомагнитного поля уменьшилась почти на 10%, она продолжает уменьшаться и сегодня. В наше время северный магнитный полюс из Арктической Канады, вблизи о.Элемир, смещается в Российскую Арктику и, по прогнозу Канад-

ской геомагнитной службы, к 2050 г. достигнет архипелага Северная Земля.

Первая глобальная карта МПЗ на базе спутниковых измерений была создана по данным спутника NASA MagSat (октябрь 1979 г. — июнь 1980 г.). Двадцать лет спустя наблюдения МПЗ продолжили космические аппараты — датский Ørsted, немецкий CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), аргентинский SAC-C (Satellite de Aplicaciones Cientificas-C). Как показал опыт, чтобы избавиться от неопределенностей, необходимо проводить одновременные наблюдения в разных точках пространства. В ноябре 2013 г. была создана группировка из трех одинаковых спутников Swarm («рой») Европейского космического агентства. Два из них на низкой орбите измеряют градиент МПЗ в направлении восток—запад, тогда как третий обращается по орбите с большей высотой и другим временем прохождения восходящего узла, обеспечивая одновременные измерения в разных точках пространства в соответствии со структурой группировки (рис.7). Через два года эволюция орбит приведет к новой структуре, когда плоскости орбит нижних спутников и верхнего станут взаимно пер-



Рис.7. Группировка спутников Swarm («рой») на низких орбитах для измерения магнитного поля Земли одновременно в разных точках пространства.

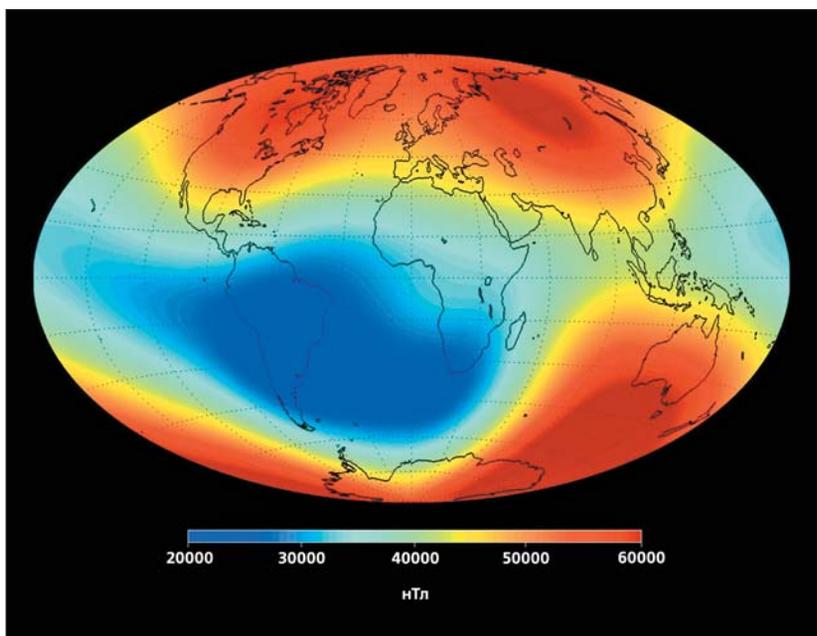


Рис.8. Модель магнитного поля Земли по результатам Swarm (по июнь 2014 г.).

пендикулярны и измерения будут проводиться в новой конфигурации «роя». Кроме двух магнитометров, установленных на штанге, на торце корпуса имеется прибор для измерения плотности, дрейфа и ускорения электронов плазмы. Вместе с измерениями электрического поля спутниковая информация позволит изучить процессы, создающие МПЗ.

Вопросы исследований первостепенной важности таковы:

- динамика ядра, процессы геодинамо, взаимодействие ядра и мантии;
- магнитные свойства литосферы и их геологическая интерпретация;
- трехмерная картина электропроводности мантии;
- токи в магнитосфере и ионосфере.

## Литература / References

1. Лебедев В.В., Гансвинд И.Н. Проектирование систем космического мониторинга. М., 2010. [Lebedev V.V., Gansvind I.N. Remote sensing systems design. Moscow, 2010. (In Russ.)]
2. Pallé E., Goode P.R., Montanes-Rodriguez P. et al. Changes in Earth's reflectance over the past two decades. *Science*. 2004; 304: 1299–1301.
3. Marshak A., Varnai T., Kostinski A. Terrestrial glint seen from deep space: oriented ice crystals detected from the Lagrangian point. *Geophysical Research Letters*. Accepted manuscript online: 15 May 2017. Doi:10.1002/2017GL073248.
4. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М., 2004. [Grankov A.G., Milshin A.A. The relationship between radio emission of the system ocean-atmosphere heat and dynamic processes at the interface. Moscow, 2004. (In Russ.)]
5. Ермаков Д.М., Раев М.Д., Суслов А.И., Шарков Е.А. Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля системы океан-атмосфера в контексте задач исследования климата планеты и атмосферных катастроф. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005; 2(2): 17–22. [Ermakov D.M., Raev M.D., Suslov A.I., Sharkov E.A. Electronic database of long-term data

Мониторинг МПЗ из космоса поможет глубже понять процессы внутри ядра, для чего привлекаются как компьютерные модели геодинамо, так и лабораторные опыты с динамо-машинами. Измерения, выполненные группировкой Swarm за первые месяцы работы, подтвердили тенденцию ослабления поля, главным образом в Западной полушарии. Однако в других районах, на юге Индийского океана, оно возрастает (рис.8). Последние измерения подтверждают также движение северного магнитного полюса в сторону Сибири. К апрелю 2014 г. испытания и проверки бортовых систем и научной аппаратуры были завершены и стали поступать надежные калиброванные данные измерений. Предварительные итоги работы группировки с ноября 2013 г. по сентябрь 2014 г. свидетельствуют,

что данные, получаемые из сравнения измерений двух нижних спутников, позволили улучшить определение как статического поля, так и его вариаций, а также увеличить пространственное разрешение вклада намагниченных пород земной коры [13].

\* \* \*

В результате космического мониторинга состояния океана, атмосферы, земного покрова и характеристик крупномасштабных процессов в этих средах накоплен огромный объем разнородных данных, охватывающих несколько десятилетий. Систематизация и претворение этих данных в базы знаний, усвоение в моделях позволят существенно снизить уровень неопределенности в сценариях будущей динамики глобальных изменений климатической системы Земли. ■

- global radio thermal field of the sistem ocean-atmosphere in the context of the objectives of the study the planet's climate and atmospheric disasters. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2005; 2(2): 17–22. (In Russ.)]
6. Современные проблемы динамики океана и атмосферы: К 100-летию со дня рождения проф. П.С.Линейкина. Ред. А.В.Фролов, Ю.Д.Роснянский. М., 2010. [Modern problems of ocean and atmosphere dynamics: The Pavel S.Lineykin memorial volume. Frolov A.V., Rosnyanskii Yu.D. (eds). Moscow, 2010. (In Russ.)]
  7. Галанин А.А., Лыткин В.М. Реконструкция сокращения ледников хребта Сунтар-Хаята за последние 60 лет на основе данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа. Географические исследования Якутии: история современность и перспективы: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня создания Якутского отдела Императорского географического общества. Якутск, 21–23 августа 2013, Якутск, 2014; 426–429. [Galanin A.A., Lytkin V.M. Reconstruction reduction of glaciers of the ridge Suntar-Hayat over the last 60 years on remote sensing data and digital elevation model. *Geograficheskiye issledovaniya Yakutii: istoriya, sovremennost i pertspektivy*. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii, August 21–23, 2013. Yakutsk, 2014; 426–429. (In Russ.)]
  8. Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширмейстер Л.И. и др. Льдинистые породы и термоденудация в районе поселка Богатая (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь). *Криосфера Земли*. 2013. 17 (1): 56–58. [Kunitsky V.V., Syromyatnikov I.I., Schirrmeister L. et al. Ice-rich permafros and thermal denudation in the Batagay area (Yana Upland, East Siberia). *Kriosfera Zemli*. 2013. 17 (1): 56–58. (In Russ.)]
  9. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Перспективы развития цивилизации: многомерный анализ. М., 2003. [Kondrat'ev K.Ya., Kravivin V.F., Savinykh V.P. Civilization Development Prospects: Multidimensional Analysis. Moscow, 2003. (In Russ.)]
  10. Nelson R.R., Crisp D., Ott L.E., O'Dell C.W. High-accuracy measurements of total column water vapor from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Geophysical Research Letters*. 2016; 43 (23): 12261–12269. Doi:10.1002/2016GL071200.
  11. Vannai T., Marzbak A. Analysis of co-located MODIS and CALIPSO observations near clouds. *Atmospheric Measurement Techiques*. 2012; 5 (2): 389–396. Doi:10.5194/amt-5-389-2012.
  12. Wermuth M.K. Gravity field analysis from the satellite mission CHAMP and GOCE. Dissertation, facultat für Bauingenieur und Vermessungswesen. Munchen, 2009.
  13. Olsen N., Hulot Y., Lesur V. et al. The Swarm initial field model for 2014 geomagnetic field. *Geophysical Research Letters*. 2015. Doi:10.1002/2014GL062659.

## Space diagnostics of Earth's climate system

I.N.Gansvind

*Geoinformation Research Centre, RAS (Moscow, Russia)*

Progressively increasing data set of global observations from different satellites opens the way for Earth's climate and weather systems studies in combining data on the ocean, atmosphere and ice dynamics for gaining new insights into critical aspects of climate change. Climate and weather systems depend on the temperature patterns of the ocean and its interaction with the atmosphere. Global data sets of the ocean altimetry measurement along with accumulated data on the distribution of temperature and salinity with depth allows building ocean topography which demonstrate a rise in global sea level and elucidate the oceanic general circulation. The dynamics of ice and snow structures make excellent index of environmental changes. As evident from the satellite and ground based data the area of glaciers in Yakutia (the East Siberia) decreased over the last 60 years almost 60%. Correlations observed between aerosol and cloud properties gives reason to investigate their impact on the radiation budget and their influence on and interaction with climate.

The magnificent seven satellites flies in formation A-train for co-located observations of cloud properties, land, atmosphere and sea surface temperature, ocean surface wind speed, providing plenty of scope for synergistic studies. The latest in the formation found a place the Orbiting Carbon Observatory-2 for high accuracy measurement of the two most important greenhouse gases. Satellites in a low Earth orbits provide the required high resolution gravity- and magnetic-field measurements.

Assimilation of stored data in models and systematization of big interconnected data from different sources afford to reduce the level of uncertainties in scenarios of the Earth's climate dynamics.

**Key words:** climate dynamics, global satellite observational data, Earth's energy budget, atmosphere-ocean-ice system, gravity and magnetic field missions.

# Балтика: тысячелетний катаклизм

А.А.Никонов

*Институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН (г.Москва, Россия)*

В статье собраны и анализируются исторические и фольклорные сведения о необычно мощных накатах морских волн на берега центральной части Балтийского моря. По ряду признаков они квалифицируются как цунами. Все они тяготеют к рубежу X и XI вв., что позволяет отнести их к одному и тому же экстремальному событию. Приводятся соображения о вероятной связи цунами с мощным землетрясением, произошедшим в Швеции вблизи современного г.Стокгольма (и древней столицы викингов г.Бирки). В течение письменного периода (после XI–XII вв.), как и в голоцене, на Балтике цунами уже отмечались, но не такой силы и охвата. Выявленные признаки древнего цунами на южных и восточных побережьях Балтики позволяют принимать в качестве максимально возможных (хотя и очень редких) заплески высотой 3–4 м и даже выше. Между тем, цунами как специфический вид природной опасности в Балтийском бассейне сейчас вообще не учитывается.

**Ключевые слова:** природные опасности, сейсмичность, палеоземлетрясения, палеоцунами, фольклор прибалтийских и скандинавских народов, Фенноскандинавский кристаллический щит, Балтийское море, X–XI вв.

Слово «катаклизм» в русском лексиконе стало обозначать разного рода бедствия и трагические случаи. По-гречески же *κατακλισμός* означает конкретно — наводнение, а расширенно — разрушительный переворот, катастрофу. Разрушительный переворот в Балтике? Да кто же об этом слышал? И откуда ему взяться? Наводнения — да, бури — да, штормы — естественно. Как ни устрашающи и гибельны они бывают на Балтике, но под понятие «переворот» не подпадают. И речь пойдет не о них. О цунами.

Чтобы слегка подготовить растерянного читателя, прежде чем обрушить на него внезапно подлинную мощь стихии, углубившись во времена бесписьменные, начнем с инцидентов, очевидцами (хотя бы отрывочно) зафиксированных. Например, напомним об Осмусаарском землетрясении 25 октября 1976 г. у берегов Эстонии [1]. Последовавшее за ним цунами (как и само землетрясение) оказалось совершенно неожиданным. При событии интенсивностью 7 баллов и магнитуде 4.7 цунами ранее не отмечались. Обычно они следуют за землетрясениями с магнитудой не менее 6–6.5. Само цунами при землетрясении 40 лет назад осталось практически незамеченным, как и при Калинин-



*Андрей Алексеевич Никонов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН. Область научных интересов — сейсмо-тектоника, палеосейсмичность, природные опасности.*

**В этом году Андрею Алексеевичу исполнилось 85 лет. Почти полвека он связан с «Природой», опубликовал у нас более 60 статей и множество научных сообщений и заметок. Мы поздравляем нашего верного автора, благодарим за многолетнее участие в жизни журнала и ждем новых интересных публикаций.**

градском землетрясении 21 сентября 2004 г. с магнитудой 4.9. Но эти факты заставляют изменить представление о невозможности цунами при землетрясениях относительно слабых.

## Дела давно минувших дней, преданья старины глубокой... (и не очень)

Века XVIII и XIX оказались щедрыми на цунами в Балтике. Вспомним о подобных событиях с высотой наката до 4 м в 1799 г. на западе польского побережья, в 1815 г. — в гавани г.Лиепая,

в 1828 г. — на востоке немецкого побережья, в 1869 г. — в Финском заливе, в 1872 г. — у Клайпеды, в 1912 г. — в Рижском заливе [2, 3]. В Гданьской бухте 15 июля 1832 г. море взволновалось, затем ворвалось в фарватер с такой силой, что прорвало шлюзы и вода с величайшей стремительностью перекатывалась из фарватера в русло р.Вислы и обратно. Все происходило при отсутствии ветра [4]. Тогда предположили связь этого «беспрецедентного» явления с подземным толчком, но о цунами у балтийских народов в то время понятия не было.

Я давно охочусь за «зверем», которого в давние времена на берегах Балтики называли Sea Baeg. Ныне в моем реестре со всеми исходными сведениями значится несколько десятков событий — исторических и доисторических (дописьменного периода), включая на всех балтийских берегах. Не наводнений, не метеособытий, а в прямом смысле — цунами. Среди них и события небезобидные, хотя, естественно, не сопоставимые с океанскими или даже средиземноморскими. Но не обращать на них внимания более нельзя. Остаются главные вопросы. Каков может быть в Балтийском бассейне максимальный масштаб цунами по охвату побережий, по высоте заплесков и, соответственно, по величине ущерба? И каков риск этого типа стихии на Балтике?

Получить ответы на них возможно, попытавшись узнать ответ на другой вопрос: какие цунами бывали здесь многие столетия назад? Известно же: чем сильнее событие, тем реже оно возникает. Самых мощных можно не дожидаться в течение жизни многих поколений.

В письменных и фольклорных источниках у разных народов и на разных землях средневековой Балтики, в пунктах, которые образуют береговую дугу протяженностью около 1000 км, обнаружены сведения, отражающие некое сильное водное возмущение экстраординарного характера. Все они приурочены к рубежу 1-го и 2-го тысячелетий, к сакраментальному «концу света» на «переломе веков». Чтобы разобраться, совершим круиз вокруг центральной части Балтийского бассейна, двигаясь против часовой стрелки.

## Циркумбалтийский круиз во времена викингов

Начнем по пунктам с запада на восток и север, используя редкие старинные сведения, фольклор и интернет-ресурсы (рис.1).

**Ретра**, давно исчезнувший город на южном балтийском берегу, к западу от устья р.Одер. Средневековый хронист Титмар фон Вальбек Мерзебургский (975–1018 гг.) описывает военный поход 1004 г. короля Генриха вдоль поморского побережья к востоку. Перед устьем р.Одер (по-славянски Бобер) к нему присоединились воины славянского племени лютичей, которые поведали о случае в своих землях. Однажды море было неласковым, более того, «страшным», «из вод выходил огромный вебрь».

В разных странах и в разные времена чудовищем, лютым зверем прибрежные жители и моряки называли громадные волны и вздыбливание вод. Их

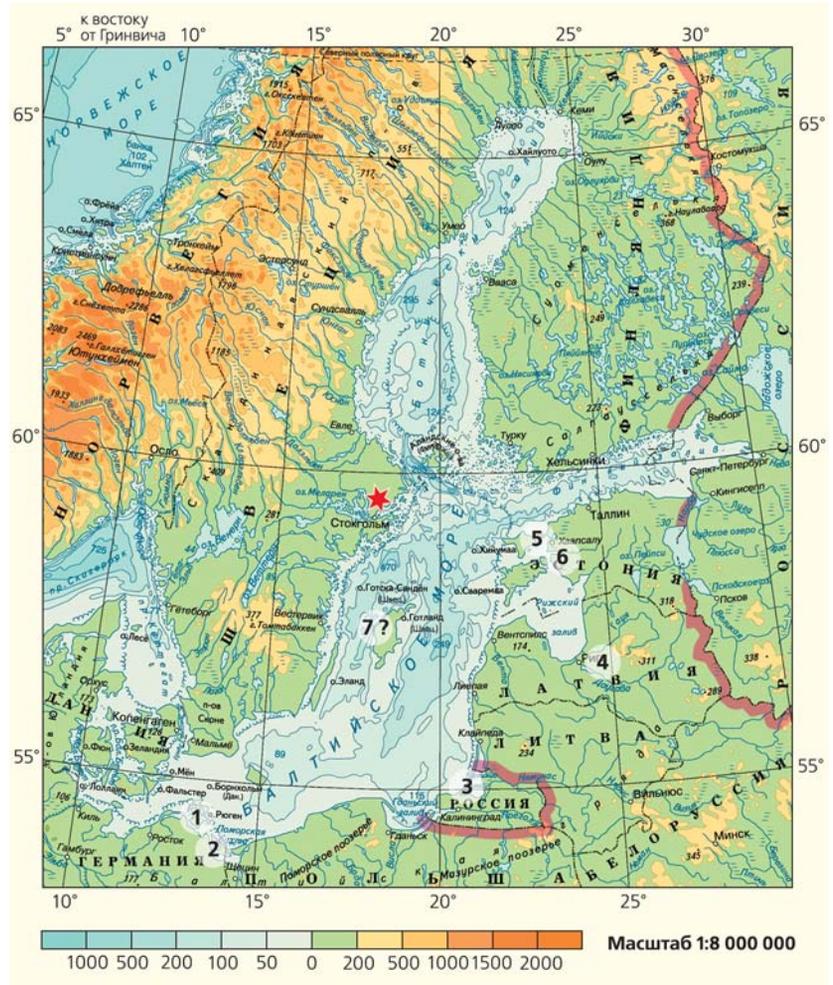


Рис.1. Расположение выявленных пунктов мощного цунами в Балтийском море и позиция предполагаемого высокомагнитудного землетрясения на рубеже 1-го и 2-го тысячелетий. 1 — Ретра, 2 — Вена, 3 — Куршская коса, 4 — долина р.Гау, 5 — Хаапсалу, 6 — Матсалу, 7 — Повикен, о.Готланд.

уподобляли животным, наводящим страх. Дикий кабан (вепрь), несомненно, хорошо был в тех местах известен — как типичный обитатель прибрежных травяных и кустарниковых зарослей в поймах рек. У славянских племен Поморья священными считались волк, рысь, лошадь, знали они и оленей. Ни одно из них в данном случае не подошло бы для сравнения. Все они животные лесные, не прибрежные, а многие из них нестрашные. Вепрь же — зверь бесспорно устрашающий.

Важная деталь в предании — «покрытые пеной белые клыки» вепря. Это не просто пена, но неумолимо стремившиеся к берегу водные струи. А кабаны как раз имели белые клыки, с которыми можно сравнить огромную, неожиданно набросившуюся водную массу. Такую стихию логично трактовать как внезапное и неукротимое цунами. А то, что в предании страшный зверь на берегу начинает «валяться в грязи», так это его имманентный признак. Для цунами на мелководном берегу также обычное дело поднимать со дна массы ила, песка и мусора, а затем перемывать их туда-сюда и выбрасывать на берега. Остается прикинуть возможный размер «огромного» вепря. Рассвирепевший зверь, будь он высотой 1–1.5 м, огромным бы не показался. Ему нужно было бы иметь в холке не менее 2–3 м.

Цунами, вторгающиеся в устья рек, особенно в эстуарии, и заставляющие реки мгновенно повернуть вспять, — явление довольно распространенное, специалистам известное. Гораздо менее известно, что при сейсмических воздействиях более 7 баллов вода из русла внезапно накатывается на берега. Подобные цунами за последние столетия многократно отмечались на разных реках Азии и Европы. И в нашем случае уместно упомянуть относящийся к 998 г. факт из той же «Хроники» Титмара Мерзебургского. «Зимой вышедшая из берегов вода [Эльбы] причинила много вреда». Зимний разлив Эльбы, за счет таяния снегов, хотя и редкость, но явление возможное. Но и накат цунами в этом месте (в том же году) исключать нельзя.

**Венета.** Далее к востоку под подозрение попал еще один участок побережья у о.Волин, вблизи бывшего устья р.Одер, где, по сведениям местной хроники, со середины IX в. располагался приморский торговый город Венета. Подводные археологи на глубине нескольких метров обнаружили там остатки строений и утварь. Среди множества артефактов собраны черепки посуды славянского типа, а также украшения из золота и янтаря — свидетельства благополучия и богатства города. А находки в настилах мостовых досок с погибших кораблей свидетельствуют, во-первых, о том, что в свое время суша больше возвышалась над морем, а во-вторых — о возможной гибели кораблей от мощного цунами. Поводом к такому слишком смелому на первый взгляд предположению дает возраст древесины из указанных настилов — 950–1000 лет (от 1950 г.). Ясно, что в настил пошли доски не трухлявые, а свежие, но уже ставшие непригодны-

ми для других нужд. Кстати, теперь установлено, что южные берега Балтики не просто размываются морем, а погружаются под его уровень со скоростью 0.6–1 мм/год [5]. Так, для погружения бывших городских улиц под воду на несколько метров за тысячелетие не нужно привлекать ни провалов, ни оползней. Улицы оставались на своем месте.

**Куршская коса.** Следующий сюжет — с берегов знакомых. Чешский епископ Адальберт принял дальнейшее путешествие в Восточную Пруссию с благим намерением обратить в христианство тамошних язычников. Как-то святой отец прогуливался по песчаному берегу. Внезапно (как в сказках, «вдруг, откуда ни возьмись...») перед ним «выросла огромная волна, поднятая как будто каким-то морским чудовищем. И вздыбленная, она разбилась с грохотом у его ног»\*.

Но море было спокойно, погода тихая, волна выросла «как из-под земли». Значит, прогуливался проповедник по открытому берегу, не под скалами — иначе волна бы его оглушила и смыла. «Огромная» — это, надо понимать, высотой не менее 2–3 м. Чтобы такая волна распласталась даже на отлогом берегу, нужно пространство не менее 200–300 м от кромки берега. Получается, что шел проповедник по пологому берегу с широким песчаным пляжем.

Путешествие датировано 998 г., детали от сподвижника убитого затем епископа вполне реалистичны. Сомневаться в правдивости нет оснований. Примечательно, что в здешних балтийских водах это событие — не единственное. Близкий пример связан с сильным землетрясением на Самбийском п-ове у тогдашнего г.Кенигсберга зимой 1303 г., когда вражеское войско пересекало замерзший Куршский залив [6]. Лед под ногами воинов вдруг стал подниматься столь крутыми волнами, что люди не могли удержаться на ногах. Случись землетрясение в более теплый период, цунами обязательно выплеснулось бы на берега.

Продвигаясь вдоль балтийских берегов к северу, не приходится рассчитывать на письменные источники тысячелетней давности. В латвийских и эстонских землях письменная история начинается с XIII в. Но зато богат местный фольклор.

### Цунами в фольклоре прибалтийских народов

По пути в Эстонию с ее мощным эпосом задержимся слегка на восточном берегу Рижского залива. Древнее народное предание сообщает, что спокойная мирная р.Гауя (она же Аа) однажды взбунтовалась и ринулась вспять. При возврате к морю она пошла не своим руслом, а использова-

\* См. Петр из Дуйсбурга: хроника земли Прусской. М., 1997; Никонов А.А. Цунами имени Адальберта // Природа. 2008. №5. С.44–49.

ла два других [7]. В 1875 г. на дне реки нашли большой корабль [8]. Тогда объяснение необычной находки увидели в высоком стоянии речных вод в XIII в. Теперь впору взглянуть иначе. Бури и наводнения срывают суда, даже крупные, с якорей и могут выносить их на берег. Но не на километры и не по рекам — против течения. На это способно сильное цунами.

**Эстонский эпос\***. Его герой — Калевипоэг, победивший в тяжелой битве Рогатого и вызволивший из подземелья трех сестер, подвергся нападению дьявольских сил, которые намеревались «за Рогатого сквитаться»\*\*. Спасенная героем сестричка

*...оглядела стаю вражью,  
Прутиком тотчас взмахнула,  
говоря слова такие:  
— Ты взметнись, чудесный пруттик,  
Ты мою исполни волю!  
Преврати ты землю в море,  
Где луга — пусть будут волны,  
Где кустарники — буруны!  
Как сказала, так и случилось.  
Все исполнил вещей пруттик:  
Залилась Долина морем,  
Покатились в нем потоки,  
Волны грозно закачались...  
Высоко вскипала пена...  
На траве откуда волны?*

Калевипоэг. Песнь 15

Откуда? Здесь нет признаков ни бури, ни наводнения, ни ветрового нагона. «Высоко вскипала пена». На какую же высоту? Никак не менее 2–3 м. «Залилась долина морем». Как далеко? Не менее нескольких сотен метров. Потоки покатались, волны грозные закачались — это что? Окрашенные ореолом народной фантазии природные явления воспринимаются специалистом как нечто очень знакомое, неоднократно сообщавшееся во времена не столь отдаленные с разных берегов, из разных частей земного шара. А где именно в данном случае «разгулялась вражья стая»? По отдельным указаниям и по контексту повествования случилось это после битвы с Рогатым, где-то в северо-западной части Эстонии, заведомо у морского берега.

*Через Западное море  
Я прошел с тесовой кладью,  
Мне залив — под подбородок  
Мне до рта — большое море.*

Калевипоэг. Песнь 16

По всем признакам речь идет о Вьянамери (Мало море) и о Хаапсалуском заливе. Сведения мифические можно подтвердить... космическими. На

\* См. Никонов А.А. Калевипоэг был жертвой цунами // Молодежь Эстонии. 5 января 2005. С.6; Никонов А.А. Цунами? В Ревеле? // Природа и Свет. 2011. №7. С.64–66.

\*\* Калевипоэг. Эстонский народный эпос / Пер. В.Державина и А.Кочеткова. М., 1956.



Рис.2. Северо-Западная Эстония. Глубоко вдающийся к востоку Хаапсалуский залив. На дне и по берегу выделяется пучок линейных гряд и ложбин, которые интерпретируются как возникшие в результате мощного цунами.

снимке Google отчетливо виден контур залива и косы, где Калевипоэгу было «под подбородок», когда он строил мост, и на снимке явственно проступила серия донных, с выходом на побережье, раструбом востоко-северо-восточной ориентации узких прямолинейных гряд и ложбин (рис.2). Ни геологическим строением, ни подводными и прибрежными процессами такая экзотика не объясняется. Только экстремально мощным накатом фронтальной волны внутрь залива и ее откатом обратно в открытое море. Отсюда: «покатились в нем [море] потоки» (не волны!). Высота такой фронтальной волны вряд ли была ниже 4–5 м. В Балтике!

Когда же на берегах Вьянамери покатались по долине потоки и по траве побежали волны? Часть сюжетов местного фольклора перекликается с финскими и скандинавскими сказаниями. Имя героя Калева в письменных источниках встречается в начале XVI в. и в середине XVII в., но корни фольклора уходят в более ранние времена. Эпизод на крайнем северо-западе Эстонии имел место значительно раньше, чем другие подвиги героя Калева на Чудском озере, где он потом и погиб. «Опускать» эпизод заливания лугов морем вглубь веков, на грань тысячелетий, было бы рискованно. Оставим его пока просто как отражение сильного цунами на западе Финского залива.

Но есть еще одна, не менее интересная «сага» из столь же отдаленных времен и с места всего на 20 км южнее. Давным-давно, до знакомства с эпосом «Калевипоэг», я обратил внимание на трактат натуралиста XIX в. Эдуарда Эйхвальда под титулом малообещающим: «Третье прибавление к учению об инфузориях России». В трактате помимо «инфузорий» (разного рода органических остатков в геологических слоях) сообщалось: «Среди

эстонцев до сих пор еще бытует сага, что прежде на материке Эстонии у Rõthel [Rõtel — на голландской карте 1662 г., Ридала — на современной карте Эстонии. — АН.], к юго-востоку от г. Матсалу, в тамошнем болоте нашли потерпевший крушение корабль». Вывод естествоиспытателя XIX в. прост: «Здесь когда-то было море».

Близ Матсалуского залива в округе Леаль, между поселениями Ванамыйза и Сейер, болото возникло на месте моря, и прежде оно было гораздо больше. В XIX в. здесь на пастбище скот собирался всегда в одном месте. При обследовании оказалось, что там лежал большой бот с солью. Рядом нашли крупный морской якорь и другие остатки судна. «Вероятно... досюда простирался морской залив». Селения Ванамыйза и Сейра до сих пор существуют. Они располагаются в долине р. Казари, впадающей в широкий, заросший камышом, мелководный Матсалуский залив (сейчас там орнитологический заповедник). Означенное место — луг на высоте 6–6,5 м над уровнем моря. Ныне — в 12 км от залива. Но и 900–1000 лет назад береговая линия не доходила до здешнего болота как минимум на несколько километров. Место болота тогда возвышалось над морем примерно на 4 м. Кто мог или что могло вдаль от береговой линии забросить бот с грузом на высоту 3,5–4 м, при том, что корабль имел осадку примерно 0,5–1 м? Кто мог или что могло аккуратно положить его посередине болотной равнины, оставив груз на месте? Да так, чтобы его не нашли и не использовали в течение 100–200 лет? Ничем, кроме цунами, объяснить это невозможно. Да и не нужно. Ибо именно при цунами такие «нелепости» и случаются. Подтверждение? Пожалуйста.

Пример с далеких Курил. «На окраине одного городка, на большом пустыре, я увидел на зеленом лугу среди пасущихся коз несколько больших рыболовных сейнеров. Это было как-то непривычно — корабли среди луга! Изрядно побитые сейнеры лежали, привалившись набок в полукилometре от моря, все ориентированные в одном направлении. Что это за склад кораблей? — спросил я своего спутника. Тот неопределенно махнул рукой — цунами, пятьдесят второй год» [9, с. 96–97].

Масштабы несопоставимые, а вот явления — одинаковые.

Чтобы проташить корабль, да по плоскому мелкому заливу, на километры — и еще на километры выбросить вбок, да на болото! На такое способна только внезапно возникающая и глубоко в долины прорвавшаяся мощная волна. Все дело в том, как далеко и на какой высоте обнаружили остатки корабля вблизи Матсалу. Ныне болото имеет абсолютную высоту поверхности около 5 м.

Тип корабля неизвестен, но можно принять, что судно имело осадку 1 м, т.е. его днище оказалось на высоте, соответствующей нынешней примерно в 4 м. Скорость возвышения суши над морем известна — 2–2,5 мм/год. Значит, при крушении судно оказалось на 1,5–2 м выше тогдашней

береговой линии. Это во-первых. Во-вторых, в X–XII вв. Матсалуский залив не простирался до места находки, а оканчивался в два раза ближе к современной береговой линии.

Эйхвальд говорил о XIII в. Но это не время крушения корабля, а время его находки после освоения современного г. Хаапсалу и постройки замка (1228). Корабль, несомненно, вынесло на берег (в болото) раньше. В IX–X вв. к эстонским берегам еще ходили ладьи викингов, шведские же корабли — не ранее X–XI вв.

В одну из семейных поездок по Матсалускому району мы отклонились от маршрута, чтобы взглянуть на «заколдованное место». Осенне-голая и унылая обширная поверхность — глазу зацепиться не за что. Так и хотелось спросить: «Как сюда катились волны? Кто на луг выбросил судно?». Приметы водного набега (если были) корова как языком слизала. Туристического взгляда здесь явно недостаточно. Нужно работать буром и лопатой, системно и долго.

Прежде чем продолжить наш круиз к западу, фиксируем две позиции.

Мощное цунами в нескольких пунктах на разных берегах могло быть вызвано только значительным землетрясением (если не допускать событий экзотических, вроде падения в акваторию огромного метеорита). Между тем ни в одном из рассмотренных пунктов с возмущениями моря на грани тысячелетий нет даже намека на сотрясение земли. Вряд ли это случайно. Скорее можно считать показателем одновременных сотрясений (если они и были) силой не выше 3–4 баллов.

Отсюда резонно вывести, что эпицентральной область инициирующего землетрясения располагалась на большом удалении — вероятно, севернее о. Готланд. Кстати заметим, существовавшее 300 лет там поселение Повикен исчезло как раз на грани 1-го и 2-го тысячелетий. Случайность? Но расположенное в узком дефиле между морской бухтой и озером при сильном цунами оно неминуемо должно было быть смыто.

Балтийский круг замкнулся? Нет, не до конца, примерно на две трети. Полдесятка сведений из различных мест, от разных народов, в разной форме, но все согласующиеся — совсем неплохо для события тысячелетней давности. Если принять одновременность сильного цунами в центральной части Балтики, то размах события заставляет считать водное возмущение не локальным и не ординарным. Оно должно было иметь и соответствующий источник, и начальную причину.

Уже одно расположение обнаруженных пунктов в виде обширной дуги побуждает предполагать источник возмущений внутри нее, т.е. искать надо, направив взгляд центростремительно. Распространение и сила события на далеких берегах не просто побуждают, а заставляют искать причину в мощном (очень мощном) землетрясении. Специалист по историческим цунами обычно вполне ориентируется

и в палеосейсмологии изучаемого региона по вполне понятной причине: подавляющее большинство сильных цунами порождаются мощными землетрясениями. Тут мы вступаем на почву, так сказать, сильно трясущуюся, но более уверенную в смысле научной основы. Выходим на юг Скандинавии. Здесь есть чем «пожиться» сейсмологам. Хотя бы потому, что сильные землетрясения в регионе известны с XIV в. Нам же надо «копнуть глубже». Начнем со сведений мифических.

**Конец мира.** Главный письменный источник — исландские саги. Записаны они в XIII в., тогда как песни скальдов до того передавались устно, вероятно, в течение нескольких веков. Лингвисты находят в сагах топонимы, ассоциируемые с восточными землями (водами). Среди них Ладожское озеро — путь (по внутренним водам нынешних Карелии и Финляндии) в Биармию, к Белому морю. Оправданно поэтому считать, что в исландских сагах отразились и экстраординарные события, происходившие на рубеже тысячелетий в Южной Скандинавии. Начало северной цивилизации, появление магических рунических знаков (а впоследствии и письма) связывают с Одином (главным божеством). Его прототип у скандинавов, как полагают, существовал между VI и XII вв. А вот на наивысших рунических камнях XI в. появились уже христианские символы. Последняя битва богов с хтоническими (подземными, потусторонними) чудовищами и затем гибель Одина должны были случиться перед этим.

Как это произошло, узнаем из исландской саги «Рагнарёк». Согласно мифическому сюжету о «последней» битве, *побежденными оказались боги (!)*. Событие сопровождалось землетрясениями и затоплением суши, т.е. неким переворотом в окружающих людей сферах (точно в соответствии с прямым значением слова «катаклизм»). Резонно принять, что не битва в сознании людей дохристианского времени обросла неистовством стихий, а, наоборот, невероятное буйство последних породило представление о битве и о силах столь грандиозных, что поверженными оказались даже всеисильные боги.

В эпосе указана предшествующая трехгодичная «великанская зима». Но вот что примечательно. Солнце проглатывается однажды, месяц похищается один раз. А мировой ясьень дрожит и гудит, вода заливают землю, нестерпимый жар длится неведомо сколько времени. И только землетрясения происходят (во множественном числе). Будь они слабые, вовлекать их в светопреобразование было бы бессмысленно. А что значит возникновение нескольких сильных землетрясений в течение, скажем, недели, месяца, года? По опыту фиксации такого роя событий в последние столетия определяются два варианта. Это серия мощных афтершоков вслед за главным толчком в разрастающейся очаговой области. Или последовательный цуг близких по силе событий, очаги которых мигрируют вдоль крупной зоны разлома, вспарывая его на десятки

километров. В любом варианте (тем более во времена доисторические) только события с интенсивностью от VIII баллов люди могли связать с «концом света». Ну и цунами (затопления) должны были последовать немалые. Да и район бедствия, подразумевается, не крошечный.

Скупое перечисление в мифе стихий нуждается в расшифровке. Вода заливают землю. Понятно — цунами. А что за «мировой ясьень», который дрожит и гудит? Это символ неохватности (бесконечности) мира, долгой истории, продления поколений и рода человеческого. У мирового ясеня «ветви простерты над всем миром и поднимаются выше неба», а «поддерживающие его корни расходятся далеко». Значит, задрожал и загудел весь мир скандинавский (по крайней мере южная его часть).

Страшные события и в местном фольклоре не мыслились без существа хтонического, разъяренного. В Скандинавии таким был зверь, другими народами Севера не привлекавшийся, гигантский волк Фенрир. Здесь ему и роль предназначалась особая. Он стал ответственным за сейсмические катастрофы. Не будь их в регионе во времена мифические, он бы, наверное, и не понадобился. В «Старшей Эдде» повествуется, как перед концом мира Фенрир вырывается из крепчайшей цепи (по воле богов изготовленной) и побеждает богов в последней битве. Как мы помним, она произошла перед XI в.

## Зри в корень!

Корень — это фокус, или очаг, землетрясения. Многие годы по всей Швеции умело и с энтузиазмом на свет божий «выкапывает» катаклизмы древности Н.-А. Мернер [10] (рис.3). В широтной полосе между Стокгольмом и оз. Венерн исследователь выделил около 20 мощных сейсмических событий за период 11–8 тыс. лет назад, т.е. вскоре после таяния ледникового покрова. Нигде в Швеции (да, пожалуй, и во всей Фенноскандии) подобного скопления древних сильных землетрясений до сих пор не обнаруживали. Сейсмический пояс Стокгольм—Венерн Мернер выделил особо. При этом он не знал о существовании флексуры Полканова, точно под ним тянущейся. А это — крупнейшая на юге Фенноскандинавского кристаллического щита древняя тектоническая шовная зона [11], и она (ее сектор в Швеции) вполне может обладать повышенным сейсмическим потенциалом (рис.4).

Господство в списке Мернера событий, произошедших во времена дегляциации, объясняется выбором для исследования отложений соответствующего возраста. В тех немногих местах юга Швеции, где изучались более молодые отложения и где землетрясения датировались с помощью радиоуглеродного анализа, ученому удалось выявить несколько сейсмических событий возрастом 4 и 3 тыс. лет и по одному 1.3 и 0.9 тыс. лет. Тут уместно вспомнить работу известного шведского

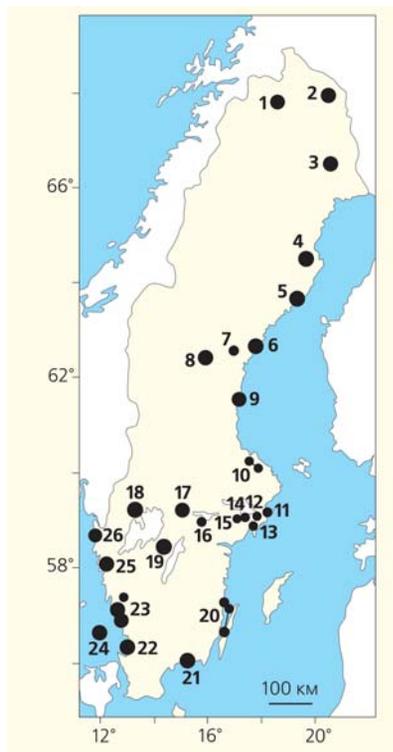


Рис.3. Карта Швеции с 26 участками, на которых обнаружены палеоземлетрясения [10]. Выделяется широтная полоса между Ботническим заливом и Датскими проливами (пункты 11 и 26).



Рис.4. Положение флексуры Полканова (красная линия) в южной части Фенноскандинавского кристаллического щита [11]. Прямоугольником отмечена область широтной зоны с эпицентрами сильных палеоземлетрясений [10] и активной сейсмичностью в исторический и инструментальный периоды.

сейсмолога М.Бота. Уже полвека назад он, составив каталог землетрясений Фенноскандии за предыдущее столетие, обнаружил, что наиболее сейсмически активна в регионе широтная полоса к западу от Стокгольма, вплоть до впадины оз.Венерн [12].

Поиск и изучение землетрясений за прошедшие тысячи лет (а в Скандинавии — за тысячу лет) требуют иных, более разнообразных и скрупулезных приемов ловли «зверя». Здесь сейсмогеологии недостаточно, и она даже не приоритетна, и потому легко упустить добычу.

В обсуждаемом поясе Стокгольм—Венерн Мернер, помимо единичных позднеголоценовых событий магнитудой около 6, нашел явные геологические признаки сопровождавших древние землетрясения мощных цунами (рис.5) и определил их голоценовый возраст [10, 13]. Будучи хорошо знаком с исландской сагой «Рагнарёк», Мернер связал отраженный в сюжете о волке Фенрире переворот с обнаруженным им палеоземлетрясением, произошедшим 3 тыс. лет назад. Но так ли это? Сомнительно. Трудно допустить, чтобы песни бродячих певцов сохранялись с неолита до позднего железного века в течение двух тысячелетий, а вот в течение двух-трех столетий (до времени христианизации Исландии) — возможно. Есть и иной вариант объяснения.

**Гибель Бирки.** В последние 20 лет я изучал сейсмичность и палеосейсмичность Фенноскандии — ногами, руками, глазами, ушами и головой, наконец. В том числе и в Швеции, при благорасположении и содействии Мернера. При второй поездке в Швецию (в 2000 г.) среди других задач в голове сидела и такая: проштудировать литературу по Бирке — бывшей столице викингов, внезапно исчезнувшей с лица земли. В запасе тогда были только место расположения бывшего города, примерная дата его гибели и собственный археосейсмический подход. До самой Бирки, хотя она доступна любому туристу, добраться воспрепятствовала российская профессорская худоба кошелька. Но плотно посидеть в библиотеке Стокгольмского университета с многотомными трудами многолетней специальной археологической экспедиции она не помешала (а любезный библиотекарь, видя прилежность необычного читателя, выдал даже бесплатную студенческую карточку для ксерокопирования).

Археологи до причины гибели Бирки не докопались. Их исследования на развалинах города велись широким фронтом, по разным направлениям, тщательно, аккуратно и в рамках традиционных интересов и представлений, складывавшихся многие десятилетия. Краткие упоминания о возможном изменении водных путей и нападении врагов

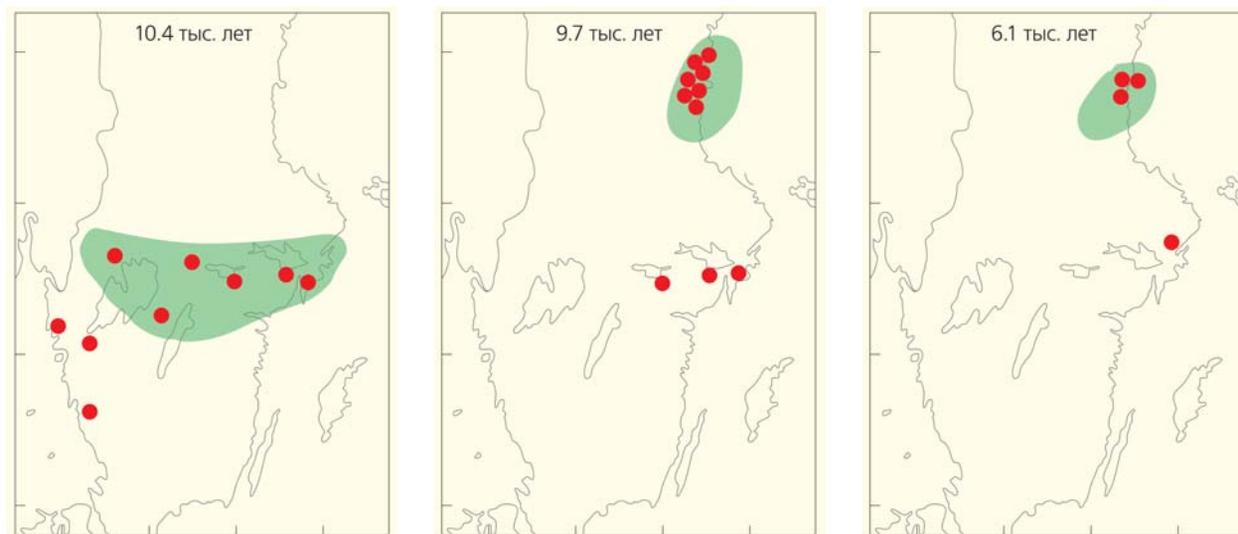


Рис.5. Юг Швеции, где Мернер установил признаки сильных цунами (красные точки) и оценил их возраст: 10,4, 9,7 тыс. лет — методом варвохронологии\* и 6,1 тыс. лет — по  $^{14}\text{C}$  [10]. Зеленым закрашены области, где обнаружены признаки ликвифакции (разжижения осадочных горных пород), которая сопровождается сильными землетрясениями в пределах зон с интенсивностью  $I \geq \text{VII}$ .

повисали в воздухе без конкретных фактов. Но документация раскопок и иллюстративный материал (что в моем положении — главное) были прекрасными. Тут обнаружилось поле, где можно было применить опыт обследования мощных событий и раскопок в районах и эпицентральных областях сильных землетрясений в высокосейсмических районах (Средиземноморском, Среднеазиатском, Кавказском). Помогло и владение археосейсмическим методом. Покинул библиотеку я с удовлетворением (пришел срок отъезда к месту главной работы на севере страны). Вопрос удалось выяснить «от противного». С помощью Мернера я попал на действовавшие раскопки более поздней (XI–XII вв.) столицы викингов — города Сигтуны, основанного также вблизи будущего Стокгольма. Полазив по траншеям раскопок и пообщавшись с приветливо-недоуменными археологами, я убедился в отсутствии здесь каких-либо признаков сейсмических воздействий, не говоря о разрушениях (в полном контрасте с тем, что отражали фото и чертежи по Бирке).

Остается сообщить, что Бирка — каменный город, общепольский торговый центр, конечный пункт Балтийско-Волжского пути из Халифата, столица непобедимых викингов — погибла в 995–998 гг. Она не возродилась. Сменивший ее город Сигтуна за время (столетия) своего существования сейсмическим разрушениям не подвергался.

**Узел петли.** Чтобы замкнуть циркумбалтийский цунами-ориентированный круиз, остается совсем немного — спуститься от оз. Венерн к югу, не пропустив на пути объекты наглядно видимые и осязаемые — геолого-геоморфологические. На

\* Оценка возраста по ленточным отложениям (варвам) приледниковых озер.

участке западного побережья п-ова Сконе, севернее г.Тореква, где подробно изучена серия береговых линий и сопряженный с ними коллювий (отложения с прилежащих склонов), выявлено несколько важных для нашего рассмотрения особенностей [10]. Мернер обнаружил там три ступенчатых снижающихся береговых линии, которые разделялись уступами высотой 0,9–1,4 м. Их возраст соответственно — 4,8, 3,5 и 0,9 тыс. лет. У подножия обращенного внутрь суши склона со скальными выходами на двух (из трех) террасах лежали осыпи угловатых, разнокалиберных обломков. Исследователь соотнес образование террасовых уступов и обломочных шлейфов на них с сейсмическими событиями. Отсутствие коллювиального шлейфа на нижней поверхности говорит о ее возникновении после землетрясения, которое могло случиться около 1 тыс. лет назад в связи с импульсным поднятием на этом участке материка. Подходяще.

Круг удастся замкнуть, вернувшись к польскому побережью. Там ждет нас новость свежая и осязаемая. Детальное изучение осцилляций уровня Балтийского моря было осуществлено в крупной лагуне Пук [14]. Исследователи подтвердили окончание фландрской трансгрессии 4 тыс. лет назад, а помимо этого они выявили «квазициклические осцилляции» уровня в последующий период. Последняя из них приходится на интервал 1,2–0,8 тыс. лет назад. Не связаны ли и эти колебания с обсуждаемым землетрясением тысячелетней давности и с последовавшим за ним катаклизмом?

И еще вопрос — подспудный, неизбежный. А все же, случались ли на Балтике в течение последнего тысячелетия сильные, письменно подтвержденные землетрясения? Мне удалось «выловить» одно, в общеизвестных каталогах отсутству-

ющее, — 6 января 1601 г. (по григорианскому календарю). «Обширное землетрясение в области Балтийского моря в Швеции, Дании (о. Борнхольм) и в Польше, с фокусом, вероятно, в южной Скандинавии, предположительно в подводной части грабена Осло. Оно ощущалось также, хотя и без точного указания мест, в северо-восточной части Германии (Пруссии)» [15, с. 56].

### Что на выходе?

Максимальные оценки намечены. На современном уровне познания можно было бы этим и ограничиться, приняв в экспертном варианте возможность панбалтийского катаклизма однажды за, скажем, тысячелетие. Имеет ли такая оценка прикладную значимость для текущей жизни и хозяйственной деятельности? Ответ определенно был бы отрицательным, если бы, как бы помягче сказать, не отягчающие обстоятельства. Рукотворные.

Спустя 100 и 70 лет после мировых войн общественность узнает о вредных отравляющих веществах на дне Балтийского моря [16]. Сотни тысяч тонн боевых отравляющих веществ были опущены на дно в нескольких местах. Часть захороненных веществ сохраняют высокую токсичность десятилетиями и столетиями. Они опасны на генетическом уровне. «Даже... одна-две молекулы, попав в организм, могут сбить его генетический код, вызвав мутации через три-четыре поколения!» [16, с.12]. За прошедшее время из-за коррозии оболочки местами сузились до критического уровня. «...Представим себе внешнее воздействие... допустим, землетрясения, гигантская волна...» [16, с.13]. То, о чем мы теперь узнаём, не может представить даже хорошо эрудированный А.М.Городницкий, не говоря о государственных деятелях, администраторах, проектировщиках, топ- и нетоп-менеджерах и тем более об обычных прибрежных жителях.

А еще не забудем, хотя и нагнетать не будем: севернее Стокгольма, у берега Ботнического залива, располагается подземное хранилище жидких радиоактивных отходов Форсмарк. Подобное (Ойкилуото) сооружается и на противоположном, финском, берегу. Оба с разветвленной инфра-

структурой. Да и в России есть объект в Финском заливе — под г.Сосновый Бор, близ Санкт-Петербурга. Нет необходимости перечислять ООО (особо ответственные объекты) и трансбалтийские коммуникации разного назначения по всем берегам, действующие и проектируемые.

Мощные волны, да и землетрясения прошлого на Балтике выявляются все в большем количестве [17]. Палеосейсмология и исследования палеоцунами в регионе развиваются стремительно. Незнание учеными (даже жизнь посвятившими изучению Балтики) возможности возникновения сильных цунами в бассейне соединяется с малым представлением опасностей рукотворных. Из-за недостаточной осведомленности всех слоев общества о сейсмо-водных катаклизмах степень риска многократно возрастает.

А что знают о цунами в Балтийском бассейне европейские специалисты? В рамках проекта TRANSFER (Риск цунами и стратегии для Европейского региона) 2006–2009 гг. (и позднее) опубликован каталог из 290 цунами примерно за 8 тыс. лет по Евро-Средиземноморскому региону, который охватывает территорию от Северного Ледовитого океана до Африки [18]. В этой объемной базовой работе весь Балтийский бассейн пуст. Белое пятно — без кавычек.

Все балтийские страны — у моря и на море. Прибрежные народы веками живут морским промыслом, морской торговлей, морским транспортом, попросту — морем. Все морские опасности здесь известны и предусматриваются. Кроме одной — цунами. Или, вернее, землетрясения и их последствия — цунами. Редкость взрывов ярости этого свирепого зверя успокоительным аргументом в наш век служить не может. В 2009 г. мы еще не знали, на что способна Балтика\*. Теперь вопрос проясняется. Балтика, оказывается, способна взрываться не только мощными землетрясениями, но и цунами с высотой заплесков не менее 3–4 м, заведомо губительными. Редко, но... Кто бы мог подумать. ■

\* Никонов А.А. Мы еще не знаем, на что способна Балтика, или Шел святой отец по пляжу // Наука и технологии в России. 2007–2008. №86–87. С.27–28.

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

### Литература / References

1. Никонов А.А. Осмуссаарское землетрясение 25.10.1976 г.: макросейсмика, сеймотектоника, механизм очага. Физика Земли. 2002; 8: 74–88. [Nikonov A.A. The Osmussaar Earthquake of October 25, 1976: Macroseismic Analysis, Seismotectonics, and Focal Mechanism. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2002; 38(8): 690–703.]
2. Nikonov A.A. Were there worthy of note earthquakes and tsunamis within the south-eastern Baltic area? Kaliningrad Earthquake September 21, 2004: Workshop Materials. Tartu, 2005; 23–25.
3. Никонов А.А. Исторические землетрясения района Юго-Восточной Балтики: проблемы и решения. Сеймотектоника плит древних платформ в области четвертичного оледенения / Ред. Р.Г.Гаредкий,

- С.А.Несмеянов. М., 2009; 150–166. [*Nikonov A.A.* Historical earthquakes of the South-Eastern Baltic region: problems and solutions. Garetskii R.G., Nesmeyanov S.A. (eds.) Seismotectonics of Plates of Ancient Platforms in Quaternary Glaciation Domain. Moscow, 2009; 150–166. (In Russ.)]
4. *Hoff K.* Chronik der Erdbeben. T.2. Gotha, 1841.
  5. *Никонов А.А., Энман С.В., Флейфель Л.Д.* Голоценовые и современные движения земной коры в переходной зоне от Фенноскандинавского щита к Восточно-Европейской платформе. Физика Земли. 2009; 8: 51–65. [*Nikonov A.A., Enman S.V., Fleifel L.D.* Recent and Late Holocene Vertical Crustal Movements in the Southeast Baltic — The Transition Zone between the Fennoscandian Shield and the Russian Plate. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2009; 45(8): 670–683.]
  6. *Никонов А.А.* Необычный «взрыв» сейсмической активности в Восточной Пруссии в начале XIV века и его значение для выяснения сейсмического потенциала Калининградской области. Вопросы инженерной сейсмологии. 2013; 40(2): 43–58. [*Nikonov A.A.* Unusual «burst» of seismic activity in Eastern Prussia at the beginning of the XIV century and its importance for evaluation of seismic potential of the Kaliningrad district, Russia. *Problems of Engineering Seismology.* 2013; 40(2): 43–58. (In Russ.)]
  7. Сборник материалов по этнографии, издаваемый при Дашковском этнографическом музее. Вып. II. М., 1887. [Collection of materials on ethnography, published at the Dashkov Ethnographic Museum. Part II. Moscow, 1887. (In Russ.)]
  8. *Арбузов Л.А.* Очерк истории Лифляндии, Эстляндии и Курляндии. СПб., 1912. [*Arbuzov L.A.* Essay on the history of Livonia, Estland and Courland. St. Petersburg, 1912. (In Russ.)]
  9. *Апродов В.А.* Зоны землетрясений. М., 2000. [*Aprodiv V.A.* Seismic areas. Moscow, 2000. (In Russ.)]
  10. *Mörner N.-A.* Paleoseismicity of Sweden. A novel paradigm. Stockholm, 2003.
  11. *Полканов А.А.* Геология хогландий-иотния Балтийского щита. Труды лаборатории геологии докембрия. Вып.6. М.; Л., 1956. [*Polkanov A.A.* Geology of the Hogland-Jotnian of the Baltic Shield. *Trudy laboratorii geologii dokembriya.* Iss.6. Moscow; Leningrad, 1956. (In Russ.)]
  12. *Båth M.* Seismic risk in Fennoscandia // *Tectonophysics.* 1979; 57: 285–295.
  13. *Mörner N.-A.* Paleo-tsunamis in Sweden // *Phys. Chem. Earth.* 1999; 24: 443–448.
  14. *Uscinowicz S., Zachowicz J., Miotk-Szpiganowicz G., Witkowski A.* Oscillations of the Baltic sea level during the Late Holocene. The Baltic: The Eighth Marine Geological Conference. Abstracts. Excursion Guide. Tartu, 2004; 57.
  15. *Sieberg A.* Beiträge zum Erdbebenkatalog Deutschlands und angrenzender Gebiete für Jahre 58 bis 1799. Berlin, 1940.
  16. *Городницкий А.М.* Тайны и мифы науки. М., 2014. [*Gorodnitsky A.M.* Secrets and myths of science. Moscow, 2014. (In Russ.)]
  17. *Никонов А.А., Шварев С.В., Николаева С.Б., Родкин М.В.* Опорные участки комплексного изучения голоценовых палеоземлетрясений восточной части Фенноскандинавского щита — методы, способы параметризации, результаты. X Всероссийское совещание по изучению четвертичного периода. Москва, 25–29 сентября 2017. [*Nikonov A.A., Shvarev S.V., Nikolaeva S.B., Rodkin M.V.* Opornye uchastki kompleksnogo izucheniya golotsenovykh paleozemletryaseni vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo shchita — metody, sposoby parametrizatsii, rezul'taty. Tenth All-Russian Meeting on Studying the Quaternary Period. Moscow, September 25–29, 2017. (In Press.)]
  18. *Maramai A., Brizuela B., Graziani L.* The Euro-Mediterranean tsunami catalogue. *Ann. Geophys.* 2014; 57(4): S0435. Doi:10.4401/ag-6437.

## Baltic: Millenium-long cataclysm

A.A.Nikonov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS (Moscow, Russia)*

Historical and folklore data on unusually powerful sea water ride-ups on the shores of the central part of the Baltic Sea are collected and analyzed in this article. For a number of reasons, they are qualified as tsunamis. All of them gravitate toward the turn of the 10th and 11th centuries, which allows them to be attributed to the same extreme event. Consideration of the possible connection of the tsunami with a strong earthquake that had occurred in Sweden near the modern Stockholm (and the ancient capital of the Vikings, Birka) is given. Tsunamis in the Baltic Sea was already noted during the Written period (after the XI–XII centuries), as well in the Holocene; but they had not so large force and coverage. The revealed signs of an ancient tsunami on the southern and eastern coasts of the Baltic make it possible to consider the wave run-ups about 3–4 m high as the highest possible waves (albeit very rare). Meanwhile, tsunamis as a specific type of natural hazard in the Baltic basin are now not taken into account at all.

**Key words:** natural disasters, seismicity, paleoearthquake, paleotsunami, folklore of Baltic and Scandinavian people, Fennoscandian crystalline shield, Baltic Sea, X–XI centuries.

# Времена и люди Знаменит, но малопонятен: академик П.С.Паллас, ученый и путешественник

Л.Я.Боркин,

кандидат биологических наук

Зоологический институт РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Петр Симон Паллас (1741–1811), благодаря своим замечательным научным трудам в самых разных областях науки, а также двум большим путешествиям по бескрайним просторам Российской империи, уже при жизни получил международную известность. По широте своих исследований в России Паллас выделяется даже на фоне века Просвещения, когда ученые не замыкались на узких темах и обычно работали по многим направлениям науки. В статье прослежен жизненный и научный путь ученого, отмечены основные его достижения. К сожалению, большая часть научного наследия Палласа сейчас по разным причинам, в том числе языковым, недоступна даже тем, кто знает это имя. Многие его книги и статьи давно уже стали библиографической редкостью и имеются лишь в единичных библиотеках.

**Ключевые слова:** история науки, XVIII век, Императорская академия наук в Санкт-Петербурге, зоология, ботаника, география, этнография, путешествия.

В 2016 г., 22 сентября, исполнилось 275 лет со дня рождения замечательного ученого и путешественника, члена Императорской академии наук в Санкт-Петербурге Петра Симона Палласа (1741–1811). Благодаря своим научным трудам в самых разных областях науки, а также двум большим путешествиям по бескрайним просторам Российской империи он уже при жизни получил международную известность.

По широте своих исследований в России Паллас выделяется даже на фоне века Просвещения, когда ученые не замыкались на узких темах и обычно работали по многим направлениям науки. Его нередко называют *последним из энциклопедистов XVIII века или завершителем эпохи универсализма века Просвещения*.

Имя Палласа можно найти во многих общих и специализированных энциклопедиях и справочниках, не говоря уже о публикациях по истории науки\*. Библиография о нем насчитывает многие десятки страниц. На его многочисленные работы часто ссылаются и в наше время. Впору говорить о формировании *палласоведения* как особого направления в истории отечественной науки [1–5].

Чтобы понять масштаб личности Палласа и его роль в науке, приведу высказывание академика

В.И.Вернадского, который хорошо знал историю науки и по сути сам был энциклопедистом. Наш выдающийся ученый полагал: Паллас — *один из величайших натуралистов... <...> ...Идеи Палласа, проявлявшиеся во всей его огромной, кипучей деятельности, оказывали неизменно свое влияние на современную научную мысль. Значение Палласа в нашей научной мысли до сих пор нами еще не осознано, и мы обязаны его мысли гораздо больше, чем мы это думаем* [6, 124].

Если вторую треть XVIII в. в истории отечественной науки справедливо называют *ломоносовской*, то символом последней трети вполне мог бы стать Паллас.

## Начало карьеры

Петер Симон родился 22 сентября 1741 г. в обеспеченной семье в Берлине; он был третьим и последним ребенком. Его отец Симон Паллас, военный врач, в 1740 г. стал профессором хирургии Берлинской медико-хирургической коллегии. Мать Сузанна Паллас происходила из семьи французских эмигрантов-гугенотов. Немецкий и французский были для мальчика родными языками.

До 1754 г. Петер учился дома и освоил английский, латинский и греческий языки. Отец, желавший сделать из него врача, отправил 13-летнего сына в Медико-хирургическую коллегию, где уже учился его старший брат Август. Среди преподавателей были известные ученые, в том числе ботаник

\* См., например: Белоусов В.В. П.С.Паллас — путешественник и геолог (К 200-летию с года рождения) // Природа. 1941. №3. С.111–116.

И.Гледич и анатом И.Меккель (старший). Такого предмета, как зоология, в коллегии не было. Тем не менее первые самостоятельные изыскания 15-летнего юноши были связаны с изучением гусениц. Он также разработал свою классификацию птиц, распределив их на девять групп по форме клюва.

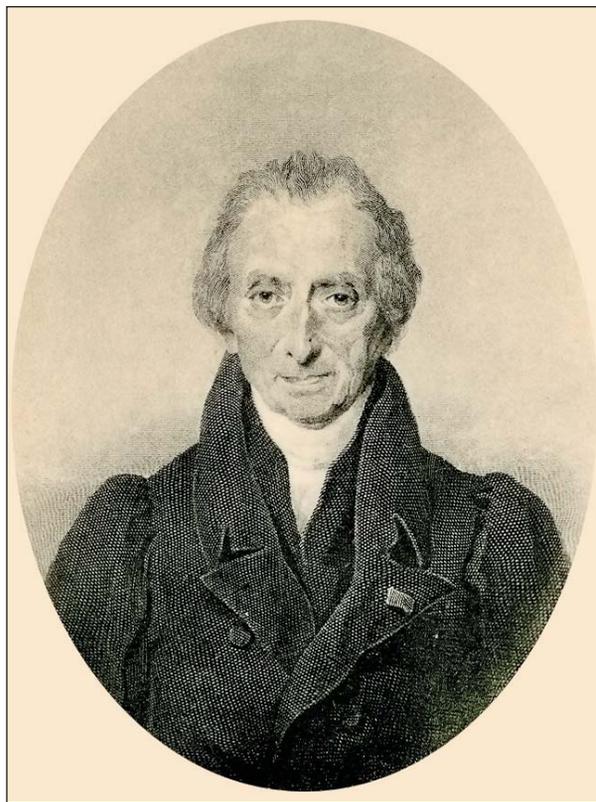
После окончания коллегии в 1758 г. Паллас продолжил свое образование в университетах Галле и Гёттингена (1759), а также в голландском Лейдене (1760). В последнем он завершил исследование по паразитическим червям «De infestis viventibus intra viventia» («О врагах, живущих внутри живых»), которое защитил в качестве диссертации по медицине. В этой работе, которая потом стала считаться началом гельминтологии, 19-летний недавний студент подверг сомнению представления знаменитого систематика К.Линнея о классе Vermes.

В 1760-х годах Паллас жил в Англии и Нидерландах, где познакомился со многими известными коллекционерами и натуралистами. Он посещал знаменитые ботанические сады и изучал богатейшие коллекции *натуралий*, как тогда называли предметы природы. Тогда же решил отказаться от медицинской карьеры и заняться естественными науками, что не нашло поддержки у отца.

Несмотря на молодость, Петер Симон произвел весьма благоприятное впечатление на своих коллег, изучавших природу. В 1764 г. 23-летнего вольного исследователя избрали членом Королевского общества в Лондоне и Римско-Кайзеровской Леопольдино-Каролинской академии естествоиспытателей в Галле (она более известна как Леопольдина).

В 1766 г. в Гааге вышла его научная монография «Elenchus Zoophytorum», посвященная так называемым зоофитам (*животно-растениям*). Так тогда называли сидячих водных беспозвоночных (губок, коралловых полипов, мшанок), внешне напоминающих растения. В своей книге Паллас подтвердил, что это именно животные. Он также пришел к смелому для того времени выводу, что между растениями и животными нет принципиальных различий и их следует относить к одному царству живых организмов, противопоставляя минералам. Поэтому в природе надо различать не три (как это сделал Линней), а только два царства — живые и неживые тела. Это фундаментальное противопоставление живого и косного вещества впоследствии высоко оценивал Вернадский [6, 124–125].

Паллас (под влиянием английского зоолога Т.Пеннанта) стал изучать *четвероногих животных*, т.е. млекопитающих. В 1766 г. вновь в Гааге вышла его вторая монография «Miscellanea Zoologica» («Зоологическая смесь»), снабженная красивыми гравюрами. На следующий год в Берлине начали издаваться сборники его статей под общим названием «Spicilegia Zoologica» (буквально — «Зоологический сноп»); всего до 1780 г. вышло 14 выпусков. В этих сочинениях Петер Симон описал множество самых разных новых или ред-



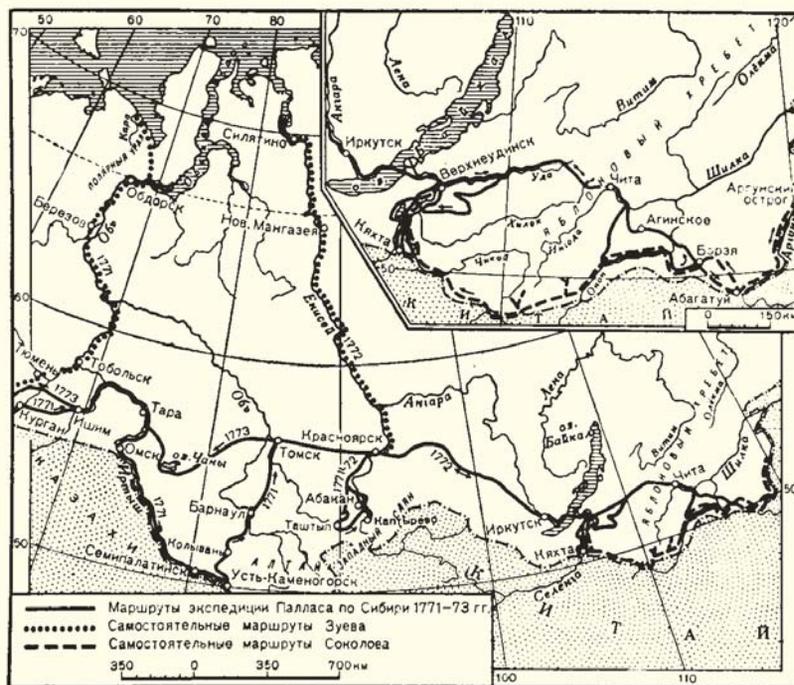
Петер Симон Паллас. Из фондов Красноярского краевого краеведческого музея.

ких видов животных, в том числе африканскую свинью-бородавочника, ланцетника (как моллюска!), род морских свинок *Cavia* и т.д.

В Нидерландах у ученого появилась возможность отправиться в качестве натуралиста в голландскую колонию на юге Африки. Однако этому воспрепятствовал отец, отозвавший сына в Берлин. Несмотря на несомненные успехи на научном поприще и признание среди европейских коллег, жизненное положение немецкого исследователя оставалось неустойчивым. Ему не удалось закрепиться в качестве ученого ни в Англии, ни в Нидерландах, ни в Берлине.

### Отъезд в Россию

Неожиданное предложение пришло из России. 22 декабря (по старому стилю) 1766 г. Палласу было отправлено письмо с приглашением от имени Екатерины II переехать на работу в Санкт-Петербург. Ему пообещали место действительного члена Императорской академии наук и профессора естественных наук, а также руководство большой экспедицией в Сибирь. Сначала отказавшись, Паллас затем все же принял предложение, и летом 1767 г. 26-летний зоолог уже присутствовал на заседании Академии наук. В Российской империи,



Маршруты экспедиции П.С.Палласа по Сибири в 1771–1773 гг. (big-archive.ru).

ставшей его второй родиной, он прожил 43 года, до 1810 г.

Молодой *академик* сразу же включился в подготовку многолетних экспедиций по Российской империи, получивших название *физических\**. Задачи, поставленные перед ними официальной инструкцией, были весьма разнообразны. Помимо *натуральной истории* следовало описывать географию посещаемого края, его природные ресурсы, экономику, историю и обычаи местных народов. Фактически это были комплексные экспедиции с необычайно широким спектром областей изучения — от физической и экономической географии до народной медицины и верований.

Однако выполнял все это в каждом из пяти отрядов один ученый с несколькими помощниками. В этих экспедициях 1768–1774 гг. наглядно проявился тип исследователя, сформировавшийся в Российской империи в первой половине XVIII в. и получивший название *универсальный странствующий натуралист* [7, с.90].

21 июля (1 августа по новому стилю) 1768 г. возглавляемый Палласом отряд в составе семи человек покинул Санкт-Петербург, отправившись в долгое путешествие вглубь обширной неведомой страны. Отряд прошел Поволжье, Урал, северную часть Прикаспия, Западную Сибирь и достиг на востоке Забайкалья (Даурии) [8].

\* Термин «физические» означал в те времена не физику в современном ее понимании, а исследования природы (от греч. φύσις — наука о природе).

Экспедиция оказалась нелегкой. Весной 1771 г. от цинги умер чучельник Шумский. Другой спутник Палласа заболел лихорадкой, еще у одного наблюдались признаки психического расстройства, а егерь был покалечен лошадью. Лишь 30 июля (10 августа) 1774 г., претерпев многие испытания, невзгоды и лишения тяжелой кочевой жизни, 33-летний естествоиспытатель вернулся на берега Невы. Он выглядел как изможденный болезнями полустарик с седеющими волосами.

В экспедиции Петер Симон вел подробный дневник, который частями вместе с отчетами (*rapортами*) отсылал в Академию наук. Его «Путешествие по разным провинциям Российской империи» было напечатано в Санкт-Петербурге по-немецки (1771–1776), а затем по-русски (1773–1788) — три части в пяти книгах. Это удивительное по своей широте произве-

дение, переиздававшееся на разных языках более 20 раз, выдвинуло его автора в число выдающихся европейских ученых. Фактически Паллас создал грандиозную панораму огромной, многоликой и тогда малоизученной страны, обрисовав ее разнообразную природу и многочисленные народы от Балтики до Забайкалья и от полярной тундры до каспийской пустыни.

«Путешествие» стало настоящей энциклопедией России второй половины 18-го столетия. Оно привлекало внимание не только различных ученых (от ботаников до востоковедов), но и таких замечательных писателей и поэтов, как Н.В.Гоголь\*\* и О.Э.Мандельштам\*\*\*. С годами научная и историческая ценность этого обширного труда Палласа только возрастает, так как его описание природы и населения позволяет (при сопоставлении с современными данными) оценить те изменения, что произошли за последние столетия.

После экспедиции Паллас прожил в Санкт-Петербурге почти 20 лет, ведя размеренную жизнь ученого и выполняя различные поручения Академии наук и других ведомств Российской империи. Он писал многочисленные статьи и книги, редактировал труды своих коллег. Посещал академические и другие заседания, вел обширную

\*\* *Сытин А.К.* Живая география России: Н.В.Гоголь изучает естественноисторические труды П.С.Палласа // Природа. 2000. №6. С.93–96.

\*\*\* *Боркин Л.Я.* Осип Мандельштам и П.С.Паллас (послесловие) // Родник знаний. 2013. №1 (8). С.31–33.

переписку с российскими и зарубежными учеными. Выпускал в Санкт-Петербурге и Лейпциге в 1781–1796 гг. семитомное издание «*Neue nordische Beiträge zur physikalischen und geographischen Erd- und Völkerbeschreibung, Naturgeschichte und Ökonomie*» («Новые северные доклады по физическому и географическому описанию земли и народностей, естественной истории и экономии») и т.д.

В 1770-х годах вышли на немецком языке две книги Палласа по этнографии. Это «Достопримечательности мордвы, казахов, калмыков, киргизов, башкир и др.» в трех томах (1773–1777), фактически сводка данных из его «Путешествия», а также капитальное двухтомное «Собрание исторических сведений о монгольских народностях» (1776–1801), которое высоко ценится востоковедами.

В 1777 г. академик выдвинул свою концепцию строения и образования гор и изменений на земном шаре. В 1778–1779 г. в немецком городе Эрланген на латинском языке вышла его монография «*Novae species Quadrupedum e Glirium ordine*» («Новые виды четвероногих из отряда грызунов»). 19 (30) сентября 1780 г. Паллас выступил в Академии наук с публичной речью об изменчивости животных. В ней он опроверг гипотезу Линнея о возникновении видов путем гибридизации, а также мнение не менее знаменитого Ж.Бюффона, согласно которому образование видов происходило под воздействием климата. В следующем году начал издаваться трактат Палласа по энтомологии «*Icones Insectorum praesertim Rossiae Sibiriaeque peculiarium*» из трех частей с иллюстрациями (1781–1798).

Параллельно с любимой зоологией ученый занимался также ботаникой. Его монография «*Flora Rossica*» (1784–1815) на латыни, к сожалению, осталась незавершенной. В русском варианте она получила название «Описание растений Российского государства» (1786). Это красивое издание большого формата с многочисленными цветными гравюрами, появившееся в Санкт-Петербурге, финансировалось лично Екатериной II, которая благоволила к знаменитому натуралисту. Позже (1800–1803) в Лейпциге была издана монография Палласа «*Species Astragalorum*» о растениях обширного рода *Astragalus* из семейства бобовых, снабженная прекрасными иллюстрациями.

По заданию императрицы Паллас составил «Сравнительные словари всех языков и наречий,



Титульные листы первых изданий книги Палласа «Путешествие по разным провинциям Российской империи». Ч.1 (на немецком и русском языках).

собранные десницею Всевысочайшей особы» (1787–1789). Это потребовало от него много кропотливого труда, внимания и времени. Словник содержал 285 русских слов, для которых были приведены эквиваленты на 200 языках и наречиях европейских и азиатских народов, вплоть до Полинезии и Новой Гвинеи (*островов Полуденного Окиана*). Были учтены, конечно, и многочисленные народы, обитавшие в Российской империи. Некоторые из местных языков, охваченных этим словником, ныне исчезли.

Петер Симон постепенно становился все более важной фигурой, чье влияние выходило за пределы Академии наук. Его мнением интересовалась Екатерина II и иностранные дипломаты. Его консультации запрашивали разные правительственные ведомства. Паллас составлял инструкции для различных путешествий, участвовал в подготовке многолетней (1785–1793) северо-восточной экспедиции Дж.Биллингса и Г.А.Сарычева.

Академик интересовался также историей российского мореплавания на севере Тихого океана. Этот регион имел тогда большое геополитическое значение и привлекал внимание сразу нескольких стран. В 1781 г. Паллас опубликовал карту новых открытий в Тихом океане, опередив на три года британское издание материалов капитана Дж.Кука. 31 декабря 1786 г. Петер Симон назначен историографом Адмиралтейств-коллегии.

Благодаря покровительству императрицы Паллас был принят при дворе и даже преподавал естественные науки ее любимому внуку Александру (будущему императору Александру I) и его младшему брату Константину.

## Времена и люди

### Дорога в Крым

Однако царская милость не была вечной, а недоброжелатели Палласа не спали. Осенью 1792 г. он был освобожден от дел по Адмиралтейств-коллегии и получил высочайшее разрешение на путешествие в Крым, присоединенный к России в 1783 г. Фактически его с почетом отправили в дальнюю ссылку. Хотя называют разные поводы для опалы, ее реальная причина неизвестна.

Свое второе большое путешествие Петер Симон совершил в 1793–1794 гг. за свой счет. Его зимний путь проходил из Санкт-Петербурга через Москву на Волгу и далее на юг России в Крым. Ехал он в двух кибитках с женой Каролиной Ивановной и дочкой Альбертиной от первого брака\*. Их сопровождал молодой немецкий художник Х.Гейслер. По пути натуралист хотел еще раз обследовать поразившие его более 20 лет назад обширные пустынные степи Прикаспия, где он открыл самобытный животный и растительный мир, ранее практически неизвестный науке.

В 1795 г. в Санкт-Петербурге на французском и русском языках появилось «Краткое физическое и топографическое описание Таврической области», составленное Палласом по поручению молодого фаворита императрицы, князя П.А.Зубова. За одно десятилетие (1796–1806) последовало 11 переизданий «Тавриды» на немецком и французском языках. Вероятно, это объяснялось не просто любопытством, но и геополитическими интересами. Вскоре (1799–1801) в Лейпциге на немецком языке появилось двухтомное описание

путешествия самого Палласа по южным наместничествам Русского государства — «Bemerkungen auf einer Reise in die südlichen Statthaltschaften des Rußischen Reichs in den Jahren 1793 und 1794», которое также неоднократно переиздавалось в Европе.

Екатерина II щедро наделила академика землями и домом (имение Шулю) в Крыму, около Симферополя\*\*, куда тот окончательно переехал в августе 1795 г. в возрасте без месяца 54 лет. Здесь Паллас прожил около 15 лет (1795–1810), сочетая жизнь помещика и ученого. Он успешно занимался сельским хозяйством, особенно виноградарством, вел неблагодарные тяжбы с соседями и местными жителями-татарами. Здесь же составил еще одну ботаническую монографию — «Illustrationes plantarum imperfectae vel nondum cognitatum» (1803–1806), в которой дано описание 55 видов растений-солеросов.

В Крыму Петер Симон завершил главный научный труд своей жизни, задуманный еще во время первого большого путешествия. Это была «Zoographia Rosso-Asiatica» («Русско-Азиатская зоография»), напечатанная по-латыни в Санкт-Петербурге. Ее три тома (изданные в 1811 и 1814 гг., уже после смерти ученого) содержали описания 874 видов позвоночных животных.

В апреле 1810 г. постаревший ученый с дочкой и внуком вернулся на родину, в Берлин. Жена осталась в Крыму. 8 сентября 1811 г. великий натуралист умер от хронического энтерита, которым страдал всю жизнь. Петер Симон был похоронен на Иерусалимском кладбище в Берлине, не дожив всего двух недель до своего 70-летия.

\* Паллас был женат трижды.



Дом Палласа в Крыму, Симферополь. 2015 г.

Фото И.В.Дорониной

### Научное наследие Палласа

Немецкий биограф Палласа Ф.Вендланд [9] составил аннотированный список всех известных публикаций своего знаменитого соотечественника, включая различные переиздания и переводы. С учетом только первых изданий Паллас за 51 год, с 1760 по 1811 г., написал 20 книг и 131 статью, отредактировал множество книг и статей, а также перевел одну книгу и семь статей (по медицине и географии). Возможно, ему принадлежало авторство еще восьми статей. Наиболее продуктивен ученый был в Санкт-Петербурге с 1776 по 1789 г.

\*\* До 1784 г. город в русских источниках назывался Ак-Мечеть а по крымско-татарски — Акьмесджит.

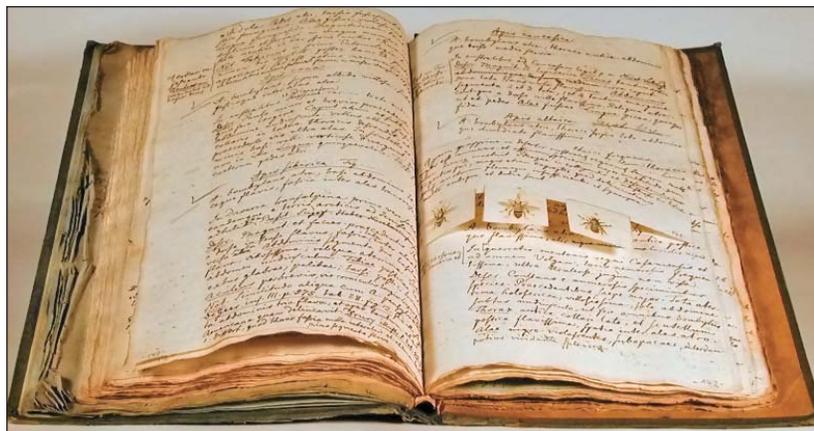
Если рассортировать работы Палласа по направлениям, то получается, что исследователь внес вклад во многие науки. Помимо зоологии и ботаники это география, геология, палеонтология, этнография, востоковедение, религиоведение (буддология), история и археология. Ученому принадлежат также печатные труды по лингвистике, нумизматике, археологии, метеорологии, медицине, сельскому и лесному хозяйству, горному делу, различным ремеслам и технологиям. Между прочим, Петер Симон опубликовал несколько работ даже о Тибете, а купленная им в Яицком городке (ныне Уральск, Казахстан) коллекция божков-бурханов положила начало буддийскому собранию нашей Академии наук.

Найденная Палласом на юге Сибири большая железокремниевая глыба весом более 40 пудов, известная как *палласово железо*, оказалась первым отождествленным наукой небесным телом. С изучением этого аэролита (тогдашний термин) связывают начало научной метеоритики, а метеориты такого типа получили название *палласиты*.

Неудивительно, что о Палласе и его влиянии на науку восторженно отзывались не только его современники, но и выдающиеся ученые XIX и XX вв. Назову лишь имена французского зоолога и историка науки Ж.Кювье, немецкого путешественника и натуралиста А.фон Гумбольдта, одного из основателей отечественной экологии и зоогеографии Н.А.Северцова.

В 1895 г. натуралист и библиограф Ф.П.Кеппен, составивший подробный список работ Палласа и изложивший его биографию [10, 11], предложил поставить в Санкт-Петербурге памятник этому замечательному ученому, а также издать в Академии наук полное собрание его сочинений. В 1904 г. железнодорожной станции в степном Нижнем Поволжье на линии, ведущей к Астрахани, дали название *Палласовка* (с 1967 г. — город).

В России (и Германии) принято публично отмечать памятные даты, связанные не только с рождением, но и со смертью выдающегося человека, причем в последнем случае — по незнанию — это также иногда называют *юбилеем*. Первый широкий всплеск к памяти Палласа произошел в нашей стране в 1911 г. в связи со столетием со дня его смерти. В газетных и журнальных статьях, а также на заседании Таврической ученой архивной комиссии был поднят вопрос о сооружении памятника Палласу в Симферополе. Памятник ученому, действительно, появился, но через много лет — уже в советское время, и не в Санкт-



Автограф страницы из незавершенной рукописи о насекомых для предполагавшегося 5-го тома «Zoographia Rosso-Asiatica». Из фондов Музея природоведения Берлинского университета имени Гумбольдта (№ 8092. S.1. Bd.5).

Петербургу или Крыму, а в Палласовке, районном центре Волгоградской обл.

Вторая мемориальная волна прошла в 2011 г., т.е. в двухсотую годовщину смерти ученого. Лишь благодаря энтузиастам конференции или памятные заседания состоялись в Палласовке, Чите, Москве, Санкт-Петербурге, возможно, и в некоторых других городах России. Однако каких-либо официальных торжеств, устроенных Российской академией наук в память о своем великом деятеле, не было. На письмо из Палласовки в Президиум РАН не стали даже отвечать.

275-летие со дня рождения Палласа в России в 2016 г. также не было отмечено на высоком официальном уровне; по крайней мере решения РАН на эту тему мне и моим коллегам неизвестны. Несмотря на явное отсутствие интереса в верхах, энтузиасты вновь провели серию Палласовских мероприятий в регионах, в том числе в Санкт-Петербурге и Омской обл.

Еще более беспокоит следующий парадокс. Судя по многочисленным статьям и книгам по истории науки, Паллас как знаменитый ученый и путешественник, несомненно, должен быть широко известен. Однако в реальности даже довольно образованные люди, в том числе многие ученые и нередко члены РАН, имеют о нем (если имеют) весьма смутное представление. В этом я смог лишь раз убедиться, сделав в апреле 2016 г. небольшой доклад о Палласе в Москве на собрании многих крупных ученых.

Однажды в Санкт-Петербурге в научном кругу, услышав слово *Паллас*, меня даже переспросили, имею ли я в виду дворец (Palace) или двусторонний безворсовый ковер (палас). Несколько лет назад моему коллеге отказали в принятии заявки на книгу о Палласе для серии «Жизнь замечательных людей», поскольку этот ученый якобы не известен читающей публике. В 2016 г. на запрос выпустить юбилейный конверт или почтовую марку соответ-



Могила Палласа в Берлине.

Фото М. Брюккел

ствующее ведомство ответило отказом (согласилось лишь на открытие).

Еще более печально то, что большая (ударение пусть читатель поставит сам!) часть научного наследия Петра Симона сейчас по разным причинам недоступна даже тем, кто знает это имя. Многие его книги и статьи давно уже стали библиографической редкостью и доступны лишь в единичных библиотеках. Более того, даже в электронном виде они остаются «за семью печатями» из-за того, что напечатаны по-немецки (готикой) или на латыни.

Приведу пример с главной книгой Палласа о животном мире нашей страны. Каждый россий-

ский зоолог знает его «Zoographia Rosso-Asiatica». Однако практически никто не знаком с реальным текстом, поскольку латинский язык не преподается зоологам с середины 1960-х годов. До сих пор нет русского издания этой фундаментальной сводки, заложившей основы отечественной зоологии! А ведь в ней впервые было описано множество видов животных, что повышает научную ценность этой монографии для систематики.

Благородный призыв Кеппена к Академии наук издать полное собрание сочинений Палласа актуален и сейчас, спустя столетие, но возможность его исполнения примерно такая же, как у полета человека на Марс. Есть, конечно, и проблески. Спустя 200 лет появился наконец-то русский перевод (неполный) немецкого описания второй экспедиции Палласа на юг России через Поволжье в Крым [12, 13]. Недавно важная теоретическая статья Палласа об изменчивости животных была также впервые издана по-русски [14, 15].

Радует тот искренний, неподкупный интерес к личности выдающегося ученого, 43 года верой и правдой служившего России, который все же можно встретить в образованном обществе. Именно такой интерес проявляет местная интеллигенция в ряде регионов нашей страны — там, где проходили маршруты этого путешественника. Приятно, что палласоведение в формате краеведения (экспедиции, исследовательские клубы, конференции, сайты и т.д.) все больше используется педагогами-энтузиастами в процессе обучения школьников. Но хотелось бы, чтобы и Российская академия наук вспомнила о своем выдающемся ученом-энциклопедисте.

В заключение приведу цитату из «Очерков по истории Академии наук» (1914–1916) мудрого Вернадского о трудах Палласа: *Они лежат до сих пор в основании наших знаний о природе и людях России. К ним неизбежно, как к живому источнику, обращается геолог и этнограф, зоолог и ботаник, геолог и минералог, статистик, археолог и языковед... <...> Паллас до сих пор еще не занял в нашем сознании того исторического места, которое отвечает его реальному значению* [18, с.339]. ■

## Литература

1. Боркин Л.Я. Добавления к библиографии Петра Симона Палласа. Историко-биологические исследования; 2011. Т.3. №3. С.130–157. [Borkin L.J. Additions to Peter Simon Pallas's bibliography // Studies in the History of Biology. 2011. V.3. №3. P.130–157 (In Russ.)]
2. Боркин Л.Я., Ганнибал Б.К., Голубев А.В. Дорогами Петра Симона Палласа (по западу Казахстана). СПб.; Уральск, 2014. [Borkin L.J., Gannibal B.K., Golubev A.V. On the pathways of Peter Simon Pallas (journeys throw western Kazakhstan). St. Petersburg; Uralsk, 2014 (In Russ.)]
3. Ефремов Ю.К. Петр Симон Паллас. Отечественные физико-географы и путешественники. М., 1959; 132–145. [Efremov Yu.K. Peter Simon Pallas // Domestic physical geographers and travelers. Moscow, 1959; 132–145. (In Russ.)]
4. Сытин А.К. Ботаник Петр Симон Паллас. М., 2014. [Sytyin A.K. Botanist Peter Simon Pallas. Moscow, 2014. (In Russ.)]

5. П.С.Паллас и его вклад в познание России / Ред. Г.А.Юргенсон. Чита, 2011. [P.S.Pallas and his contribution to knowledge of Russia / Ed. G.A.Yurenson. Chita, 2011 (In Russ.)]
6. Вернадский В.И. Живое вещество. М., 1978. [Vernadsky V.I. The living substance. Moscow, 1978. (In Russ.)]
7. Боркин Л.Я. Роль немцев в становлении и развитии герпетологии в России // Русско-немецкие связи в биологии и медицине: опыт 300-летнего взаимодействия. СПб., 2000; 82–104. [Borkin L.J. Role of Germans in the formation and development of herpetology in Russia // Russian-German links in biology and medicine: experience of 300 years' interaction. St. Petersburg, 2000; 82–104. (In Russ.)]
8. Сытин А.К., Боркин Л.Я. «Блаженство видеть Природу в самом ее бытии...». О сибирском путешествии академика Палласа. Наука из первых рук. 2007; 1: 78–89. [Sytin A.K., Borkin L.J. «What a bliss it is to see Nature in its very being...». Science First Hand. 2007; 1: 78–89. (In Russ.)]
9. Wendland F. Peter Simon Pallas (1741–1811). Materialien einer Biographie. Teil 1–2. Veröffentlichungen der Historischen Kommission zu Berlin. Bd.80/I–II. Berlin; N.Y., 1992.
10. Кёппен Ф.[П.] Ученые труды П.С.Палласа. Журнал Министерства народного просвещения. СПб., 1895; 298 (апрель): 386–437. [Köppen F. Scientific works of P.S.Pallas. Magazine of the Ministry of national education. St. Petersburg, 1895; 278 (April): 386–437. (In Russ.)]
11. Кёппен Ф.[П.] Паллас, Петр Симон. Русский биографический словарь. [Том] «Павел, преподобный — Петр (Илейка)». СПб., 1902; 153–162. [Köppen F. Pallas, Peter Simon // Russian biographic dictionary. [Vol.] «Pavel, the Reverend — Pyotr (Ileyka)». St. Petersburg, 1902; 153–162. (In Russ.)]
12. Паллас П.С. Наблюдения, сделанные во время путешествия по южным наместничествам Русского государства в 1793–1794 годах. Сер. «Научное наследство». Т.27. М., 1999. [Pallas P.S. The observations made during the travel on the southern governorships of the Russian state in 1793–1794. Moscow, 1999. (In Russ.)]
13. Паллас П.С. Заметки о путешествии в южные наместничества Российской империи в 1793 и 1794 годах. Том первый: избранное. Сер. «Астраханская губернская библиотека». Астрахань, 2008. [Pallas P.S. Notes about a travel to the southern governorships of the Russian Empire in 1793 and 1794. Vol. one: selected. Astrakhan, 2008. (In Russ.)]
14. Паллас П.С. Мемуар об изменчивости животных (Mémoire sur la Variation des Animaux). Историко-биологические исследования. 2011; 3(3): 72–87. [Pallas P.S. Mémoire about the variation in animals (Mémoire sur la Variation des Animaux). Studies in the History of Biology. 2011; 3(3): 72–87. (In Russ.)]
15. Колчинский Э.И. П.С. Паллас: креационист или додарвиновский эволюционист? (Многолетний спор об эволюционных взглядах П.С.Палласа). Историко-биологические исследования. 2011; 3(3): 21–41. [Kolchinsky E.I. P.S.Pallas: creationist or pre-Darwinian evolutionist? (Long-term dispute on evolutionary views of P.S.Pallas). Studies in the History of Biology. 2011; 3(3): 21–41. (In Russ.)]
16. Вернадский В.И. Труды по истории науки (Сер. «Библиотека трудов академика В.И.Вернадского»). М., 2002. [Vernadsky V.I. Works on Science History. Moscow, 2002. (In Russ.)]

## Well-known, but obscure: academician P.S.Pallas, a scientist and a traveller

L.J.Borkin  
Zoological Institute, RAS (St. Petersburg, Russia)

Peter Simon Pallas (1741–1811) due to his remarkable contributions to many fields of science, and also to two long travels across the vast territory of the Russian Empire has gained the international fame already during his lifetime. On the width of his research in Russia Pallas is allocated even against the background of the Century of Enlightenment when scientists didn't focus on narrow subjects and usually worked in many directions of science. In article the life and scientific way of the scientist is tracked, his main achievements are noted. Unfortunately, the most part of scientific heritage of Pallas is for various reasons, including linguistic one, inaccessible for Russian scientists, even now to those who know this name. His many books and articles became rarities for a long time and are available only in few libraries.

**Key words:** History of Science, 18th century, Imperial Academy of Sciences in St. Petersburg, Zoology, Botany, Geography, Ethnography, travels.

## Астрофизика

### Происхождение самых мощных сверхновых

Наша исследовательская группа, в которую входят сотрудники Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова и Института теоретической и экспериментальной физики имени А.И.Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», в кооперации с коллегами из Японии и США разработала модель, объясняющую излучение сверхмощных сверхновых взаимодействием их выброса с плотной протяженной околозвездной средой, обедненной водородом. Результаты нашей работы недавно опубликованы в «Astrophysical Journal»\*.

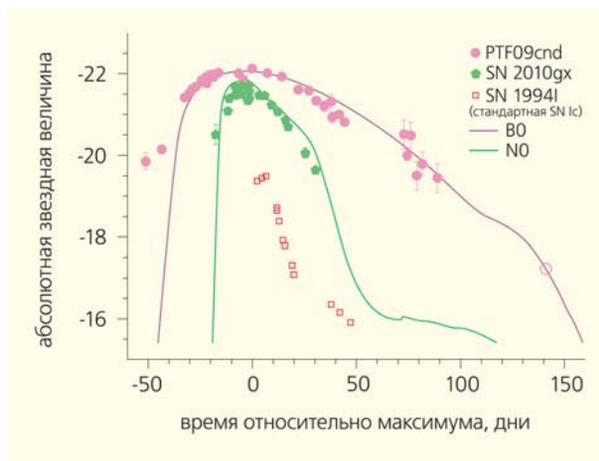
Сверхновыми называют звезды, излучающие в максимуме блеска (в течение нескольких недель) почти столько же света, сколько целые галактики, состоящие из миллиардов «солнц». С точки зрения эволюции сверхновые — это последняя стадия жизни многих звезд. Взрыв сверхновой приводит либо к ее полному разрушению, либо к коллапсу в нейтронную звезду или черную дыру.

За последние десять лет обнаружено, что в далеких, бедных металлами, слабых галактиках с активным звездообразованием иногда вспыхивают сверхмощные сверхновые, излучающие в 10, а порой и в 100 раз больше света, чем обычные. Объяснение природы таких объектов стало вызовом для мирового астрофизического сообщества. Ученые рассматривают разные сценарии, приводящие к излучению гигантской энергии, которая наблюдается во время вспышки, и большинство моделей исходит из того, что мощность излучения обеспечивается необычно большой мощностью самого взрыва. Наша группа предположила, что взрыв сверхмощной сверхновой может быть лишь немного сильнее обычного, но при этом сама взрывающаяся звезда должна быть окружена массивной протяженной безводородной оболочкой, которая состоит из смеси гелия, углерода и кислорода, образовавшихся в ходе эволюции этого объекта.

Когда выброс сверхновой разлетается не в пустоту, а в достаточно плотную окружающую среду,

формируется система ударных волн, где эффективно происходит переработка кинетической энергии быстро разлетающегося выброса в тепловую, переходящую затем в излучение. При взрыве в пустоту разлетающееся вещество, вначале горячее, остывает, продолжая быстро расширяться, а в случае с оболочкой оно тормозится, при этом дополнительно разогревается, а значит, имеет возможность излучать больше и дольше. Мы показали, что именно этот механизм может объяснить как мощность, так и продолжительность свечения значительной части сверхмощных сверхновых.

В принципе модель взрыва сверхновой внутри околозвездной оболочки известна давно. Например, выделен целый класс так называемых сверхновых типа II<sub>p</sub>, более ярких, чем обычные, которые имеют узкие линии водорода в спектре. Их происхождение объясняется взрывами звезд, сбросивших часть своих водородных атмосфер незадолго до гибели.



Кривые блеска (зависимости звездной величины от времени) двух сверхмощных сверхновых — PTF09cnd и SN 2010gx. Наблюдаемое падение блеска у SN 2010gx (зеленые пятиугольники) — одно из самых быстрых среди известных сверхмощных сверхновых, у PTF09cnd (фиолетовые круги) — одно из самых медленных. Теоретические кривые блеска получены в численных расчетах для модели взаимодействия выброса сверхновой с окружающей ее околозвездной углеродно-кислородной оболочкой массой 10 масс Солнца (зеленая линия) и 50 масс Солнца (фиолетовая линия). Для сравнения красными квадратами показана кривая блеска классической сверхновой типа Ic без оболочки — SN 1994I, блеск которой в максимуме на две звездных величины (т.е. почти в десять раз) ниже, чем у сверхмощных сверхновых.

\* Sorokina E., Blinnikov S., Nomoto K. et al. Type I superluminous supernovae as explosions inside non-hydrogen circumstellar envelopes // *Astrophys. J.* 2016. V.829. №1. Doi:10.3847/0004-637X/829/1/17.

Случай сверхмощных сверхновых необычен тем, что водород — основной элемент атмосферы звезды — должен быть утерян по крайней мере за несколько лет до ее взрыва, так как он не виден в спектрах. Возникает вопрос: что представляют собой звезды, которые, потеряв или исчерпав водородный запас, перед коллапсом в черную дыру или нейтронную звезду способны сбросить еще до нескольких десятков масс Солнца более тяжелых элементов? Во-первых, очевидно, что они должны быть очень массивными — возможно, более массивными, чем рождаются в нашу эпоху. Во-вторых, при рождении они, скорее всего, содержали меньше тяжелых элементов, чем наше Солнце. Таким звездам, согласно современной теории эволюции, проще сохранить свою массу до конца жизни, не потеряв ее в виде звездного ветра. Таким образом, в виде сверхмощных сверхновых мы, вероятно, наблюдаем взрывы так называемых звезд II и III поколений, образовавшихся в эпоху молодой, еще бедной тяжелыми элементами Вселенной.

© **Е.И.Сорокина**,

кандидат физико-математических наук  
Государственный астрономический институт  
имени П.К.Штернберга  
Московского государственного университета  
имени М.В.Ломоносова

**С.И.Блинников**,

доктор физико-математических наук  
Институт теоретической  
и экспериментальной физики имени А.И.Алиханова  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Москва

## Оптика

### Захват света цепочкой диэлектрических наночастиц

Наша теоретическая группа из Института физики имени Л.В.Киренского СО РАН и Сибирского государственного аэрокосмического университета имени М.Ф.Решетнева, которая изучает явление захвата света в открытых оптических системах, провела расчеты и выяснила, что цепочка из одинаковых диэлектрических шариков будет вести себя как световод, который улавливает и захватывает свет, препятствуя его утечке в окружающее пространство. Идея такой «ловушки» основывается на взаимном интерференционном ослаблении волн, уходящих от цепочки, при правильном подборе радиуса шариков. Результаты наших исследований опубликованы в «Advanced Electromagnetics»\* и в ряде других престижных журналах.

Впервые на странность решения уравнений Максвелла в диэлектрических периодических

структурах обратили внимание в 1994 г. Анна-Софи Боннет-Бендхиа и Фелипе Старлинг\*\*. Но их статья была опубликована в труднодоступном математическом журнале и долгое время оставалась неизвестной электромагнитному сообществу. Лишь с началом этого века появился ряд целенаправленных работ по захвату света в периодических структурах, состоящих из диэлектрических стержней разного сечения и наночастиц, в воздухе и на подложках\*\*\*. Число таких исследований растет, так как оказалось, что явление захвата света периодическими структурами имеет ту же природу, что и феномен идеального отражения волн, или связанного состояния в континууме, который был предсказан в 1929 г., еще на заре квантовой механики, Джоном фон Нейманом и Юджином Вигнером. Однако главный интерес ученых к связанным состояниям в континууме вызван, конечно, новыми прикладными возможностями, такими как лазерование света периодическими структурами и сверхчувствительными сенсорами\*\*\*\*, а также захват и высвобождение света по требованию\*\*\*\*\*.

Как известно из электродинамики, изолированный стержень способен захватить электромагнитную волну при условии, что ее частота расположена ниже световой линии. Это означает, что свет в пустоте может лишь рассеиваться на стержне с характерными резонансами, но не может быть захвачен из пустого пространства. То же самое относится к изолированному диэлектрическому шарiku и вообще к частице произвольной формы. Но если стержни или шарики расположить в виде регулярной периодической цепочки, ситуация меняется принципиально. Такие периодические структуры хорошо известны в оптике и называются дифракционными решетками. Главное их свойство заключается в рассеянии света только в дискретные направления, что кардинально облегчает задачу его захвата — остается лишь подавить утечку в эти избранные направления, в которых образуются дифракционные максимумы разного порядка. Направления, дающие порядок дифракции, зависят от периода решетки; их называют иногда дифракционными континуумами. Если же ограничиться более скромной задачей поймать свет с частотой ниже второго дифракционного континуума, задача становится вполне решаемой.

\*\* Bonnet-Bendbia A.-S., Starling F. Guided waves by electromagnetic gratings and non uniqueness examples for the diffraction problem // Math. Methods Appl. Sci. 1994. V.17. P.305.

\*\*\* Hsu C.W., Zhen B., Stone A.D. et al. Bound states in the continuum // Nature Rev. Mat. 2016. V.1. P.1; Bulgakov E.N., Sadreev A.F., Maksimov D.N. Light trapping above the light cone in one-dimensional arrays of dielectric spheres (Review) // Appl. Science. 2017. V.7. P.147.

\*\*\*\* Kodigala A., Lepetit T., Gu Q. et al. Lasing action from photonic bound states in continuum // Nature. 2017. V.541. P.196.

\*\*\*\*\* Bulgakov E., Pichugin K., Sadreev A. All-optical light storage in bound states in the continuum and release by demand // Optics Express. 2015. V.23. P.22521.

\* Bulgakov E., Sadreev A. Trapping of light with angular orbital momentum above the light cone // Advanced Electromagnetics. 2017. V.6. №1. P. 1–10.

В 2015 г. мы предложили периодическую структуру в виде одномерной цепочки диэлектрических шариков\*. Такая система, помимо периодичности в расположении шариков, обладает симметрией вращения вокруг оси цепочки, задаваемого азимутальным углом, что вводит еще одну характеристику дифракционных континуумов — они маркируются по моменту вращения (угловому орбитальному моменту). И критическим для записания света здесь оказывается радиус шариков. Однако для того чтобы цепочка шариков захватила свет из окружающего пространства, необходим материал с очень высоким (выше четырех) показателем преломления. Таким параметрам соответствуют, к примеру, кремний или арсенид галлия. Кроме того, технологически изготовить по крайней мере сотню одинаковых шариков не просто, поэтому в настоящее время мы взяли один стержень, у которого показатель преломления периодически изменяется вдоль оси стержня\*\*. Цепочка диэлектрических дисков в стопке — это частный случай такого стержня. Мы нашли множество возможностей для захвата света, в том числе и с очень большим орбитальным моментом. Сейчас для развития систем, поддерживающих связанные состояния в континууме, и экспериментального подтверждения результатов наша группа сотрудничает с Санкт-Петербургским национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-00266), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-02-00314, 17-52-45072) и Министерства образования и науки РФ (государственный контракт 3.1845.2017).

© А.Ф.Садреев,

доктор физико-математических наук  
Институт физики имени Л.В.Киренского СО РАН  
Красноярск

## Гидрофизика

### Характеристика поверхностных волн по спутниковым изображениям солнечного блика

Современные системы космического наблюдения оснащены аппаратурой с колоссальными измерительными возможностями, что обеспечивает получение гигантских потоков информации. Технический прогресс в этой области требует разработки принципиально новых подходов и методов ее обработки и интерпретации. Один из таких подходов предложила наша исследовательская группа

\* Bulgakov E, Sadreev A. Light trapping above the light cone in one-dimensional array of dielectric spheres // Phys. Rev. A. 2015. V.92. P.023816.

\*\* Bulgakov E, Sadreev A. Bound states in the continuum with high orbital angular momentum in a dielectric rod with periodically modulated permittivity // Physical Review A. 2017. (В печати).



Изображение солнечного блика на морской поверхности.

из Морского гидрофизического института РАН (Севастополь) и Российского государственного гидрометеорологического университета (Санкт-Петербург), работающая в кооперации с европейскими коллегами. Свой метод, который основан на использовании информации, содержащейся в изображениях солнечного блика на морской поверхности, мы подробно описали в двух статьях, опубликованных недавно в журнале Американского геофизического общества «Journal of Geophysical Research: Oceans»\*.

Солнечный блик на спутниковых снимках океана представляет собой яркие области, где прямое солнечное излучение, отраженное от поверхности океана, преобладает над излучением, формирующим «цвет океана». Такие участки, как правило, отбраковываются при традиционном анализе оптических изображений. Однако, используя простые закономерности зеркального отражения солнечных лучей, можно получить ценную информацию о пространственно-временных характеристиках океанических поверхностных волн.

Соответствующие методики активно разрабатывались с середины прошлого века в приложении к фотографиям морской поверхности, сделанным с летательных аппаратов и со стационарных объектов, возвышающихся над морской поверхностью. Применение таких методик к спутни-

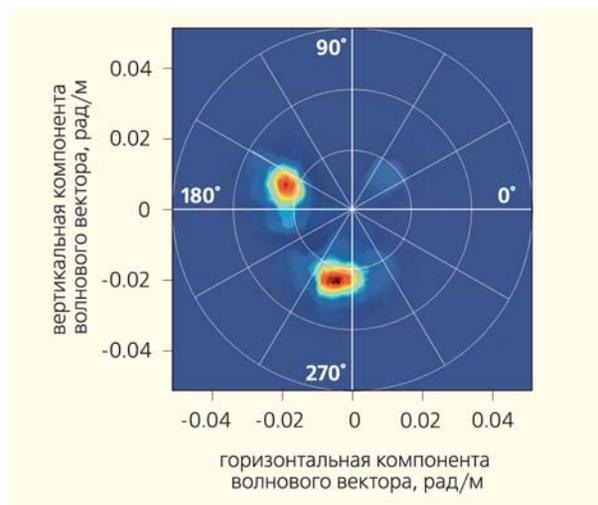
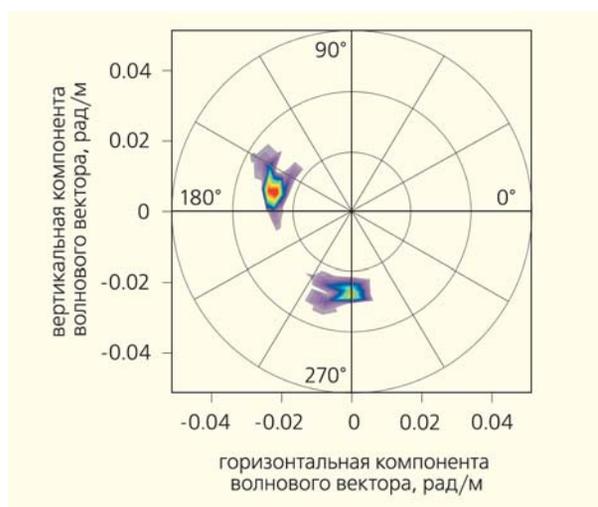
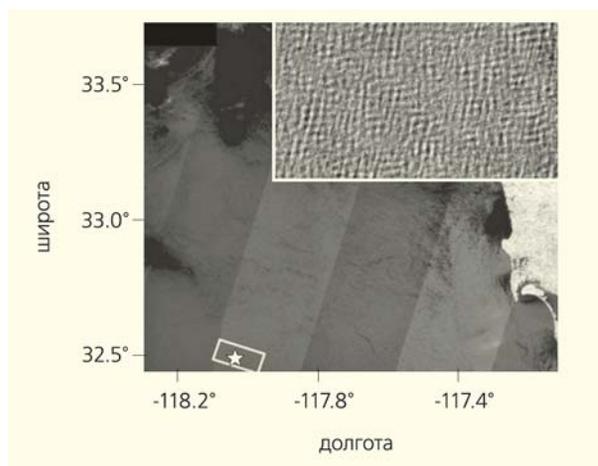
\* Kudryatsev V, Yurovskaya M, Chapron B. et al. Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: Directional spectrum retrieval and validation // J. Geoph. Res. Oceans. 2017. V.122. Doi: 10.1002/2016JC012425; Kudryatsev V, Yurovskaya M, Chapron B. et al. Glitter imagery of ocean surface waves. Part 2: Waves transformation on the ocean currents // J. Geoph. Res. Oceans. 2017. V.122. Doi:10.1002/2016JC012426.

ковым снимкам позволило бы доступным способом получать данные о волнении на больших акваториях океана, причем оперативно и без существенных затрат на проведение сложных экспериментов. Однако при реализации этой идеи возникает принципиальное техническое ограничение, присущее большинству современных спутниковых оптических систем: в отличие от объектива фотокамеры космические датчики, как правило, сканируют земную поверхность в направлении, перпендикулярном полету, а двумерное изображение формируется за счет движения спутника. В результате невозможно напрямую оценить пространственное изменение яркости солнечного блика, необходимое для последующего получения статистических характеристик морской поверхности. Тем не менее нашей группе удалось использовать технические особенности конструкции оптического сканера с Европейского спутника «Sentinel-2» (сканирование группами датчиков, расположенными под разными углами) для корректной оценки градиента яркости изображения в направлении движения спутника. Это позволило восстанавливать высоту волн и рассчитывать двумерные энергетические спектры.

Еще одна особенность конструкции «Sentinel-2» — задержка по времени между съемками поверхности в разных спектральных диапазонах — позволяет определять направление распространения волн (что невозможно сделать по одному «замороженному» изображению), а также восстанавливать пространственно-временные характеристики волн, например, зависимость скорости волн от их частоты (дисперсионное соотношение). По отклонению этой зависимости от классического дисперсионного соотношения волн можно получать оценки скорости поверхностного течения в дополнение к существующим методам спутниковой альтиметрии, основной недостаток которых — небольшая площадь покрытия земной поверхности.

Эффективность предложенного подхода мы продемонстрировали путем сравнения восстанавливаемых характеристик волнения с данными натурных измерений в различных районах океана. Метод восстановления высот океанических волн был также применен для исследования волнения в районе течения мыса Игольного, к югу от Африки. В области интенсивного течения было обнаружено увеличение энергии волн в семь раз по сравнению с соответствующими характеристиками вне течения, что служит свидетельством известного эффекта захвата волн течением, приводящего к изменению траектории волн, концентрации в стержне течения и их аномальной высоте (последнюю нередко рассматривают как возможную причину кораблекрушений в этом районе).

Принципиально новый для спутниковых методов подход к оценке спектров поверхностных волн, его обобщение на другие оптические спутни-



Сопоставление пространственных спектров возвышений морской поверхности, полученных предложенным методом, с данными натурных измерений. Снимок «Sentinel-2» от 19 апреля 2016 г., его фрагмент (прямоугольная область) и положение волнового буя, обозначенного звездочкой (вверху); спектр по данным волнового буя (National Data Buoy Center, [www.ndbc.noaa.gov](http://www.ndbc.noaa.gov); в центре); спектр, восстановленный по изображению «Sentinel-2» (внизу).

ковые сенсоры могут стать основой для развития исследования волнения на больших акваториях океана, получения энергетических спектров волнения и идентификации аномально высоких волн.

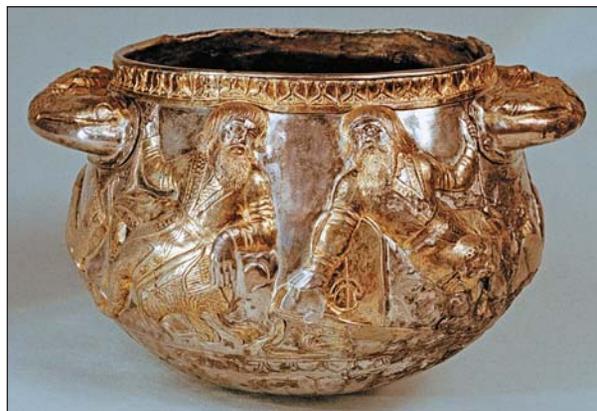
© **М.В.Юровская,**

кандидат физико-математических наук  
Морской гидрофизический институт РАН  
Севастополь

**В.Н.Кудрявцев,**

доктор физико-математических наук  
Морской гидрофизический институт РАН  
Севастополь

Российский государственный  
гидрометеорологический университет  
Санкт-Петербург



Чаша с рельефными изображениями фигур скифов. Серебро с позолотой. IV в. до н.э. Национальный музей Украины, Киев.

## Антропология

### К проблеме происхождения скифов

Скифы — один из самых загадочных народов древности. Неожиданно появившись в степях Северного Причерноморья в VIII в. до н.э. и вытеснив обитавших там киммерийцев, они бесследно исчезли с исторической арены в IV в. н.э., растворившись в окружающих народностях и не оставив прямых потомков.

Проблема происхождения скифов, десятилетиями привлекающая внимание антропологов, историков, археологов и лингвистов, сводится к двум основным гипотезам, восходящим корнями к «Истории» Геродота (прибл. 445 г. до н. э.). Согласно первой, скифы пришли на территорию Северного Причерноморья из Центральной Азии, завоевав и ассимилировав коренное население региона. Вторая гипотеза предполагает, что скифы были генетически связаны с местными племенами бронзового века, принадлежащими срубной культурно-исторической общности (XVI–XII вв. до н. э.).

Один из устойчивых мифов о скифах как о предках славян сложился давно. Согласно взглядам Б.А.Рыбакова, изложенным в его книге «Геродотова Скифия» (1979), часть скифских племен, так называемые скифы-пахари, возможно, приняла некоторое участие в этногенезе славян в силу длительной географической близости. Однако гипотеза о том, что скифы — прямые предки славян, не подтверждается ни археологическими, ни антропологическими, ни генетическими, ни лингвистическими данными.

Наша группа антропологов из Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова высказала предположение, что генофонд скифов был сформирован в результате смешения местных племен с популяциями, мигрировавшими в регион Северного Причерноморья из Центральной Азии\*. Мы провели сравнительный анализ 323 черепов из различных могильников с территории Крыма и Нижнего Поднепровья (Не-

аполь Скифский, Беляус, Золотое, Николаевка-Казацкое и Золотая Балка), принадлежащих поздним скифам (III в. до н.э. — III в. н.э.), а также краниологических серий из могильников ямной, катакомбной, срубной, окуневской и андроновской культурно-исторических общностей эпохи бронзы (188 черепов). Для оценки генетической преемственности между скифами Северного Причерноморья и популяциями бронзового века Восточной Европы и Центральной Азии мы использовали генетически обусловленные вариации в анатомическом строении черепа (так называемые «неметрические» признаки) и на основании этих данных вычислили генетические расстояния между популяциями.

Полученные результаты позволили предположить, что обе гипотезы этногенеза скифов частично верны: популяции поздних скифов обнаружили генетическую связь как с племенами срубной культуры бронзового века из Поднепровья и Придонья, так и в некоторой степени с населением окуневской культуры с территории Хакасии. Было обнаружено также генетическое сходство между различными популяциями эпохи бронзы, распространенными на огромном пространстве от Северного Причерноморья до Центральной Азии. Это сходство, удивительное на первый взгляд, представляется вполне оправданным, учитывая высокую степень мобильности степных кочевников. Появление и распространение верховой езды, а также колесного транспорта позволяли древним племенам мигрировать на большие расстояния и облегчали генетические контакты между кочевыми группами.

© **А.А.Мовсесян,**

доктор биологических наук  
Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова

\* *Movsesian A. A., Bakboldina V.Yu.* Nonmetric cranial trait variation and the origins of the Scythians // *Am. J. Phys. Anthropol.* 2017. V.162. №3. P.589–599.

# Петр Иванович Лисицын: судьба ученого на фоне эпохи

Р.А.Фандо,

кандидат биологических наук

Институт истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН (г.Москва, Россия)

**Ж**анр научной биографии считается достаточно сложным и ответственным делом, поскольку требует от автора не только умений работать с архивными документами и анализировать научное наследие, но и присутствия навыков психолога, способного понять мотивы поведения ученого и ярко изобразить психологический портрет той или иной личности. С этой задачей великолепно справилась Ольга Юрьевна Елина, написавшая работу о жизни и деятельности выдающегося ученого-селекционера Петра Ивановича Лисицына (1877–1948). Автор детально проследила, как складывались характер и мироощущение будущего деятеля науки, красочно описала такие качества его личности, как целеустремленность, одержимость работой, самокритичность, бескорыстность, умение прийти на помощь любому нуждающемуся, патриотизм, служение выбранным еще в детстве нравственным идеалам.

При написании биографии Елина не только воссоздала судьбу героя, но и детальным образом проанализировала социокультурные аспекты конца XIX — первой половины XX в. — переломного периода в истории нашей страны. Кроме жизни Лисицына в книге представлена также социальная история отечественной сельскохозяйственной науки. Данный подход, соединяющий социальную историю науки и биографический жанр, объясняется организационной деятельностью Лисицына, который стоял у истоков отечественной селекции и семеноводства, участвовал в разработке программ преобразования агрономии, создавал селекционный отдел Шатиловской опытной станции и Шатиловскую Госсемкультуру. По роду своих занятий ученому-селекционеру приходилось сотрудничать со многими высокопоставленными чиновниками Советского государства, не всегда это взаимодействие было плодотворным, о чем свидетельствуют материалы книги.

Особую ценность исследованию придает введение в научный оборот большого массива архивных документов, хранящихся в Мемориальном кабинете-библиотеке П.И.Лисицына, Государственном архиве Калужской области, Российском государственном историческом архиве, Государственном архиве Российской Федерации, Российском государственном архиве экономики, Центральном государственном архиве г.Москвы, Архиве Российской академии наук, Архиве Российского государственного аграрного университета — Московской сельскохозяйственной академии имени К.А.Тимирязева (Тимирязевской академии). Такое внимательное отношение к историческим источникам помогло не только детально описать жизненные перипетии в судьбе Лисицына, но и развенчать многие бытовавшие мифы о нем.

Одним из таких мифов было представление о рождении ученого в бедной крестьянской семье. Автор книги воссоздала по крупицам



**О.Ю.Елина. У ИСТОКОВ  
РОССИЙСКОЙ СЕЛЕКЦИИ  
И СЕМЕНОВОДСТВА.  
ПЕТР ИВАНОВИЧ ЛИСИЦЫН  
НА ШАТИЛОВСКОЙ  
ОПЫТНОЙ СТАНЦИИ  
И ГОССЕМКУЛЬТУРЕ.**

М.: Издательство «Наука»,  
2016. 360 с.

историю семьи Лисицыных, наглядно продемонстрировав читателям, что представители династии были образованными крестьянами, которые владели имением Телятинки, вели рациональное сельскохозяйственное производство, занимались образованием и воспитанием многочисленных детей. Все братья и сестры Петра Ивановича получили гимназическое образование, многие окончили университеты или другие высшие учебные заведения. Семья была совсем не бедная, так как содержала работников и получала доходы с продажи сельхозпродукции, модернизировала собственное производство, а также обеспечивала обучение и проживание детей в Калуге, Москве и Санкт-Петербурге.

Ярко и живо описывает автор детские и юношеские годы Петра Лисицына, снабжая повествование то выдержками из писем, то его дневниковыми воспоминаниями. Из записей будущего ученого понимаешь, что еще с малых лет ему были привиты стремление к самообразованию, расширению познавательных горизонтов, желание трудиться во благо общества, взаимовыручка и добросердечность. Дети в семье Лисицыных интересовались искусством, много читали, ставили театральные пьесы, играли на различных музыкальных инструментах. Сам Петр брал частные уроки музыки и стал впоследствии неплохим скрипачом. Жизнь в атмосфере творчества и веры в прогресс науки была характерной для сельской интеллигенции конца 19-го столетия, не случайно в этой среде сформировалось множество выдающихся деятелей науки и искусства.

Не менее интересно представлено в книге описание студенческой жизни Петра Ивановича. Сначала читатель попадает в стены Московского университета, который на рубеже веков славился блестящим профессорско-преподавательским составом. Ключевой фигурой в судьбе юного героя стал физиолог растений Климент Аркадьевич Тимирязев, знаменитый своей верой в дарвинизм, независимостью взглядов и «левыми» убеждениями. В 1901 г. Тимирязев получил отставку в связи с поддержкой политически активных студентов, одним из которых оказался сам Петр Иванович: он еще в 1899 г. был удален из университета за участие во всероссийской студенческой забастовке. Жизнь П.И.Лисицына в «изгнании» в родовом имении автор книги воссоздает по переписке с А.Н.Лебеядцевым, обнаруженной в Российском государственном архиве экономики. Данные письма настолько откровенны, что позволяют проникнуть в мир душевных переживаний юноши. Такая открытость переписки объясняется крепкой дружбой Лисицына и Лебеядцева, что позволяло им говорить о том, о чем не всегда можно было поделиться с членами семьи или однокурсниками.

После окончания Московского университета Лисицын вслед за Лебеядцевым поступает в Московский сельскохозяйственный институт. Здесь

Петр Иванович с особым увлечением начинает заниматься экспериментами по агрохимии и физиологии растений. Автор наглядно демонстрирует, как непросто у главного героя книги происходил выбор научной специализации. Для многих биографий ученых традиционным стало преувеличение, что с ранних лет «юные гении» проявляли страсть к изучению определенных наук. В жизнеописании Лисицына мы видим, как он пробовал себя в различных областях агрономии, прежде чем связать свою судьбу с селекционной работой. В дальнейшем его глубокие знания в почвоведении, агротехнике, растениеводстве, микробиологии, агрохимии пригодились в организации крупномасштабной селекционной работы.

Интересный этап в жизни Петра Ивановича был связан с его военной службой. Елина развенчала миф о том, что молодой агроном был отправлен царской охранкой в ссылку на Северный Урал. На самом деле он просто отбывал воинскую повинность, как и многие выпускники университетов. Записавшись вольноопределяющимся, Лисицын отправился на службу в Сибирь. Впоследствии он иронично назовет свою службу «ссылкой», отсюда появятся фразы о реальной ссылке в некоторых биографических очерках об ученом. Во время службы он воочию увидел быт солдат и офицеров, ощутил голод — как физический, так и интеллектуальный, понял всю дикость и жестокость военной жизни. Все это ярко и образно воссоздается благодаря письмам Лисицына, в которых видно его негативное отношение к казарме и непреодолимое желание поскорее вырваться из этой среды, чтобы заняться научной работой.

Свою научно-организационную деятельность Лисицын начал на Шатиловской селекционной станции, на которой он проработал 20 лет. Именно на «шатиловском периоде» биографии Лисицына автор книги сосредоточила свое внимание, обозначив это даже в названии монографии. Именно там произошло профессиональное становление Петра Ивановича как ученого и умелого организатора опытно-селекционной работы. Здесь он в полной мере проявил свои исследовательские таланты, невероятную работоспособность, смог привлечь к решению проблемы воспроизводства сортовых семян «сильных мира сего», что вызвало небывалый подъем и расцвет в жизни Шатиловской станции.

Одна из особенностей книги — рассмотрение научного наследия ученого на фоне истории развития Шатиловской станции, а также трансформационных процессов, происходивших в те годы в стране. В первые годы работы на станции Лисицын постигал практические азы агрономии, агротехники, селекции и ряда других смежных дисциплин. Затем, после принятия в 1912 г. закона «О насаждении сельскохозяйственных опытных учреждений», Шатиловская станция была преобразована в областную, курирующую региональ-

ную опытную сеть. Лисицын возглавил селекционный отдел станции и начал крупномасштабную работу по отысканию сортов сельскохозяйственных растений, наиболее оптимальных по хозяйственным и биологическим особенностям. События Первой мировой войны и революционных преобразований умело вплетены Елиной в канву истории деятельности опытной станции. Перед читателями предстают картины мобилизации сотрудников станции, экономических трудностей военного времени, земельных реформ, последовавших после Февральской революции, национализации земли после октября 1917 г. Гражданская война и тотальная продразверстка привели сельское хозяйство страны к глубокому кризису. В целях сохранения опытного дела ученые начинают искать государственный патронаж, и усилия многих из них, в том числе и Лисицына, помогают «мобилизовать» селекционную работу на решение продовольственных задач молодого социалистического государства. Голод после засухи и неурожая начала 1920-х годов заставил Советское государство искать выход из сложившегося кризиса путем введения в 1921 г. новой экономической политики (нэпа). Специалисты опытной Шатиловской станции, как и многие ученые-аграрии, включились в работу по практической помощи крестьянским хозяйствам. Петр Иванович поставил перед собой задачу реализовать проект создания Шатиловской Госсемкультуры.

Предложение Лисицына оказалось как нельзя кстати и было одобрено государственными чиновниками. Основная идея проекта заключалась в создании крупного питомника маточных семян, где бы поддерживалась чистота семенного материала, а в дальнейшем — в распространении его на посевных площадях хозяйств. С реализацией плана Лисицына руководство страны связывало большие ожидания, надеясь в короткий срок поднять с колен угробленное сельское хозяйство. Опытная работа Шатиловской станции была взята

на вооружение государственными деятелями, а в дальнейшем положена в основу создания Госсемкультуры. Патронами данного проекта можно считать В.В.Оболенского (Н.Осинского), А.Д.Цюрупу и, конечно же, В.И.Ульянова (Ленина), активно обсуждавших организационные и законодательные стороны грандиозного плана. Работа региональных Госсемкультур привела к ожидаемым результатам: в значительной степени увеличилось производство сортовых семян, активно внедрялись новые сорта, повысилась урожайность возделываемых культур. Таким образом, создание в первые годы советской власти крупных семеноводческих хозяйств совершило переворот в сельском хозяйстве и было сравнимо по своим масштабам с социально-экономической революцией.

К большому сожалению, созданная тяжелыми трудами система Госсемкультур была уничтожена в конце 1920-х годов в связи с начавшейся коллективизацией. Нападкам подверглась Шатиловская селекционная станция, в прессе была развернута кампания против деятельности Лисицына. Пришлось оставить родное детище и перейти на должность заведующего кафедрой селекции в Тимирязевскую сельскохозяйственную академию. Но и тут вскоре стали активно прорастать корни лысенкоизма, с которым Петр Иванович активно боролся, защищая генетику и научную селекцию.

При чтении книги возникает чувство гордости за русского ученого-селекционера, который с достоинством прошел войну, революции, время голода и репрессий, не прекращая свое любимое занятие — селекцию сельскохозяйственных растений. Жизнь Лисицына была наполнена высокими научными результатами и признанием со стороны коллег и учеников, но одновременно и трагизмом, когда разрушилось созданное им детище, безусловно, нужное для решения многих научных и практических задач семеноводства и селекции. ■

## Физика. Кристаллография

Д.Г.Кошуг, О.Д.Кротова. ФИЗИКА МИНЕРАЛОВ: Учебник. М.: ИНФРА-М, 2017. 348 с.



Курс физики минералов, читаемый на кафедре минералогии геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, до настоящего времени остается уникальным как для российских, так и для зарубежных университетов. Разработка новых методов исследования структуры минералов (таких как: электронография и спектроскопия в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения) позволила выявлять локальные неоднородности кристаллического вещества. Появление высокоразрешающих методов микроскопии дало возможность перейти к характеристике морфологии и структуры минералов с высокой детальностью, вплоть до атомарного уровня. В учебнике рассмотрены вопросы, касающиеся основ физических свойств минералов и некоторых физических явлений. Учебник можно условно разделить на две части. В первой описаны свойства минералов, связанные с колебаниями атомов, с образованием точечных, линейных, двумерных и объемных дефектов. Вторая часть посвящена описанию электронного строения атомов и ионов, находящихся как в свободном, так и в связанном состоянии в кристаллах. Рассмотрены квантово-механические теории электронного строения твердого тела и их применения для объяснения окраски и люминесценции минералов, их магнитных свойств.

## Этнография

М.Ю.Мартынова. ПУТЕШЕСТВУЕМ ПО ЭТИКЕТУ: ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭТНОГРАФИЯ. М.: Наука, 2017. 104 с. (Серия «Академкласс»).

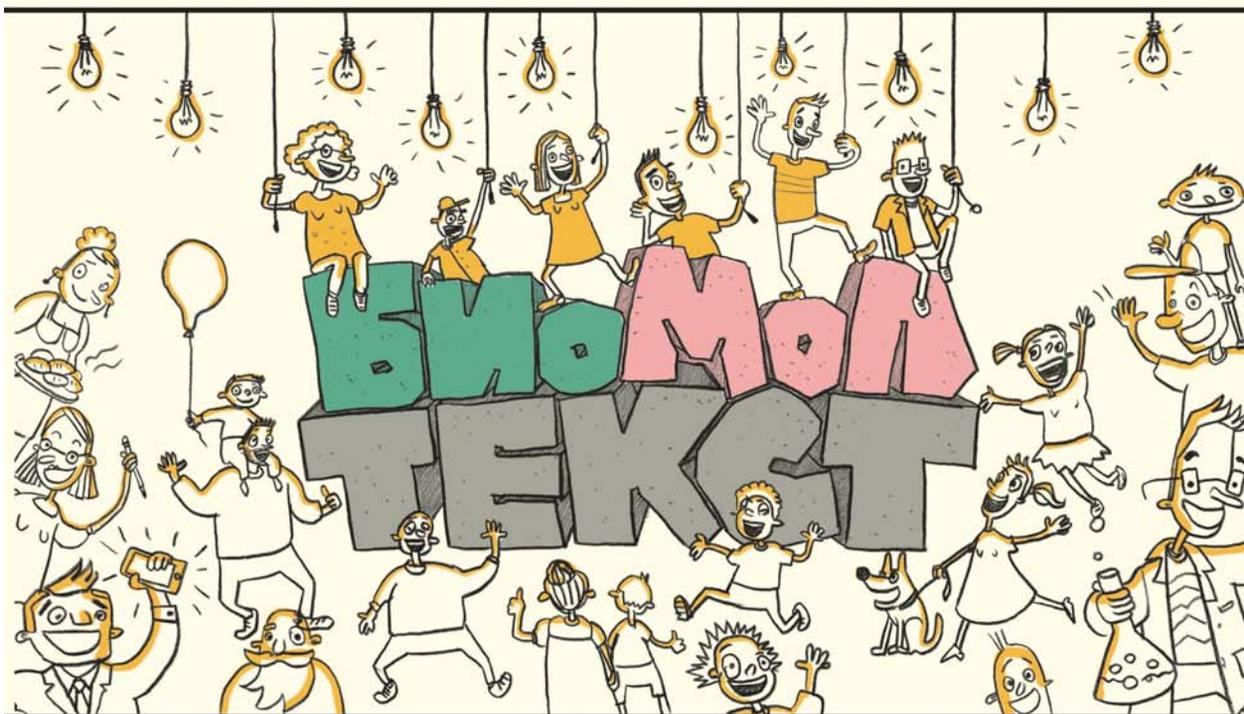
Исторический и технический прогресс делает человечество все более единообразным, смешивая народы, культуры и языки. В современных условиях глобализации это приобрело невиданные ранее масштабы. Однако традиции, выработанные на протяжении веков у разных народов, сохраняются и играют важную роль, будучи культурными нормами. Наша культура — это та призма, через которую мы смотрим на окружающий мир. У людей часто возникает иллюзия, что их видение мира, их поведение и образ жизни единственно возможные и приемлемые. А между тем в культуре каждого народа есть свои законы, целесообразные нормы и правила поведения, знать которые интересно и полезно. Изучение культурных особенностей жителей разных уголков мира помогает в общении и обогащает нашу жизнь. Мудрость культурного взаимодействия заключается в том, чтобы не спешить с умозаключениями, когда люди делают, на наш взгляд, что-то странное, а постараться понять их. Особенностям этикета в разных уголках земного шара посвящена книга Марины Юрьевны Мартыновой — доктора исторических наук, директора Института этнологии и антропологии РАН, с которой Издательство «Наука» начинает новую серию научно-популярных книг известных российских ученых.



# Биомолекула

Научно-популярный сайт  
о современной биологии

Объясняем



## Конкурс научно-популярных статей

### Номинации

- Свободная тема по биологии
- Своя работа
- Биомедицина сегодня и завтра\*
- Наглядно о ненаглядном: нарисуй науку!  
«Места»: где работать в биологии?

\* Работы в этой номинации оценивает известный биохимик Борис Животовский

### Призы

- Приз в каждой номинации – 30 тыс. руб.
- Приз зрительских симпатий – большой чекап «Инвитро»

### Партнеры конкурса

**INVITRO**

**Бластим**  
Работа в биотехе

**VISUAL SCIENCE**  
Visualization, Communication & Education

**АНО**  
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН



Прием работ до 1 октября 2017 года!

[biomolecula.ru/biomoltext/bio-mol-tekst-2017](http://biomolecula.ru/biomoltext/bio-mol-tekst-2017)



# *Вулканы и облака*

**В.Е.Быкасов**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
Петропавловск-Камчатский*





Вулкан Корякский.  
Здесь и далее фото автора

Вулканы во время извержений — великолепное и завораживающее зрелище. Но и в спокойном состоянии они весьма благодатный объект для фотосъемки. Возвышаясь над окрестными долами и горами на несколько километров, вулканы не просто притягивают к себе обычную облачность, но и сами оказываются ее генераторами. Прогретый воздух прилегающих равнин, поднимаясь вдоль вулканических склонов вверх, постепенно остывает. При этом находящийся в нем водяной пар начинает, обычно ближе к обеду, конденсироваться и формировать вокруг вулканической постройки местный очаг облачности. Изумительные атмосферные явления удалось сфотографировать над камчатскими вулканами Шивелуч, Ключевской, Камень, Острый Толбачик, Шапочка, Корякский, Авачинский, Мутновский и Виллючинский.

**Ключевые слова:** Камчатка, вулканы, извержения, необычные атмосферные явления

Так уж получилось, что почти всю свою жизнь я пробродил по долам и горам Камчатки. Многое довелось мне увидеть. Изумительные по красоте закаты и восходы, а также мрачное — до черноты — осенне-зимнее небо. Бурное течение горных рек и величавое спокойствие океана. Неистовое исторжение из земных недр шлаково-пепловых туч и красочно-ленивое течение лавы. Нежные краски северного лета и буйство осенних расцветок растительности накануне ее отмирания. Ослепительную белизну снега и феерическую синеву неба после прохождения очередного циклона. Не говорю уж о медведях, оленях и снежных баранах, о скоплениях нерп на камнях, обнажающихся во время отлива, о причудливых скалах и о невообразимо изогнутых под тяжестью снега древесных стволах.

К сожалению, почти половину этой бродячей жизни мои руки не держали фотоаппарата. В начале — из-за того, что в далеком северном поселке он был в диковинку. Затем — как-то не пришло в голову его приобрести. К тому же меня, как и многих молодых, вполне устраивало, что все виденное отчетливо сохранялось в памяти, а потому и не нуждалось в фиксации на фото пленке.

Однако со временем я понял, что далеко не всегда могу словами передать то, что когда-то видел и ощущал. Ну, например, как донести впечатление от фантастического пролета гусиных стай в мае 1959 г. Тогда, после нескольких дней последней весенней пурги, сотни гусиных стай, переживавших непогоду в 25–50 км южнее пос. Палана, разом поднялись в воздух и почти на полчаса закрыли весь обозримый небосвод, хотя обычно стаи гусей следуют одна за другой с интервалами от нескольких минут до получаса и более.

Вот и пришлось обзавестись фотоаппаратом. Но при этом возникли новые проблемы. Дело

в том, что фотоаппарат (а тем более фотоаппарат хороший!) в нашей тьмутаракани приобрести было непросто. Столь же непросто было доставать пленку, химикаты и фотобумагу. Именно доставать, а не покупать. Ну а когда позднее я перешел на слайды, проблема добывания цветной обратимой пленки и химикатов для ее проявления стала и вовсе почти неразрешимой, так как найти все это можно было только в стольных городах, куда попадал лишь во время отпуска или командировки. Да и то если повезет. Так что зачастую я выезжал в поля с двумя-тремя фотопленками на весь сезон, дрожа буквально над каждым кадром. Нередко случалось так, что самый лучший вид (сюжет) попадал на глаза тогда, когда пленка уже была израсходована. Или, наоборот, сэкономишь на каком-то кадре, а впоследствии выясняется, что именно он мог бы стать одним из лучших в том сезоне.

Правда, в последнее время подобные проблемы отпали, поскольку цифровая техника позволяет многое. Но, к сожалению, увидеть то, что видел когда-то, практически невозможно, за редчайшими исключениями. То есть, конечно же, можно прийти или приехать туда, где был увиден тот или иной феномен. Можно подгадать сезон, месяц, день и даже время суток. Но чтобы при этом еще и состояние атмосферы (ясное или, наоборот, заволоченное тучами небо; прозрачный воздух или полупрозрачная дымка; обыденный свет солнца или невероятная его подсветка и т.д.) соответствовали, хотя бы приближенно, тому прошлому событию... Впрочем, ставлю многоточие, и обращаюсь к вулканам и облакам.

Обычно, когда речь заходит о вулканах, нам показывают извержения и образующиеся при этом эруптивные тучи. Что само по себе прекрасно, а порой и просто изумительно. Однако вулканы и в мирное, так сказать, время, весьма благодарный объект для съемки. Надо только в нужный момент попасть в нужное место. Вот несколько таких видов, подмеченных мною в разное время, я и хочу предложить вниманию читателей. С небольшим комментарием к каждому из снимков.

Но поначалу несколько слов об облаках на вулканах. Дело в том, что, возвышаясь над окрестными долами и горами на 0.5–2 км и более, вулканы не просто «притягивают» к себе обычную облачность, но и сами оказываются ее генераторами. Прогретый воздух прилегающих равнин, поднимаясь вдоль вулканических склонов вверх, остывает. При этом находящийся в нем водяной пар начинает, обычно ближе к обеду, конденсироваться и формировать вокруг вулканической постройки местный очаг облачности. Очаг может быть (в том числе и в зависимости от высоты конуса) как сплошным, закрывающим собой всю верхнюю часть вулкана, так и двойным. И мне доводилось несколько раз побывать на такой высоте, когда

сверху и снизу была сплошная облачность, между поясами которой прекрасно просматривался окружающий горизонт. Иногда встречались и ситуации, когда нижний пояс приподнимался и смыкался с верхним (или, наоборот, опускался верхний пояс; бывало и так, что они оба устремлялись навстречу друг другу), с тем чтобы через некоторое время вновь разойтись. Но отразить такое можно было только кинокамерой в специальном режиме съемки. Так что читателю остается лишь поверить мне на слово.

Действующие вулканы активно влияют на формирование облачности, даже когда они находятся в состоянии покоя, поскольку выделяют большие объемы газов, до 95–98% которых составляет водяной пар. В обычных условиях такие вулканические эманаии практически неразличимы глазом. Однако при некоторых состояниях атмосферы (например, при подходе теплого, насыщенного влагой переднего фронта очередного циклона) выделяемый вулканом пар конденсируется над его вершиной в виде своеобразной «шапочки». Именно по ней, кстати, местные жители почти безошибочно предсказывают наступление ненастья. А почти безошибочно потому, что иногда циклон, лишь по касательной приблизившись к территории нашего полуострова, осадки изливает все же в стороне.

Впрочем, и при обычной погоде, но при усилении фумарольной деятельности, над вершиной того или иного вулкана образуется самостоятельное и иногда довольно большое облако. Оно может стоять над вулканической постройкой и несколько минут, и несколько часов, и даже несколько суток.

Ну а теперь, после этой вводной части, можно перейти к фотографиям и к комментариям.

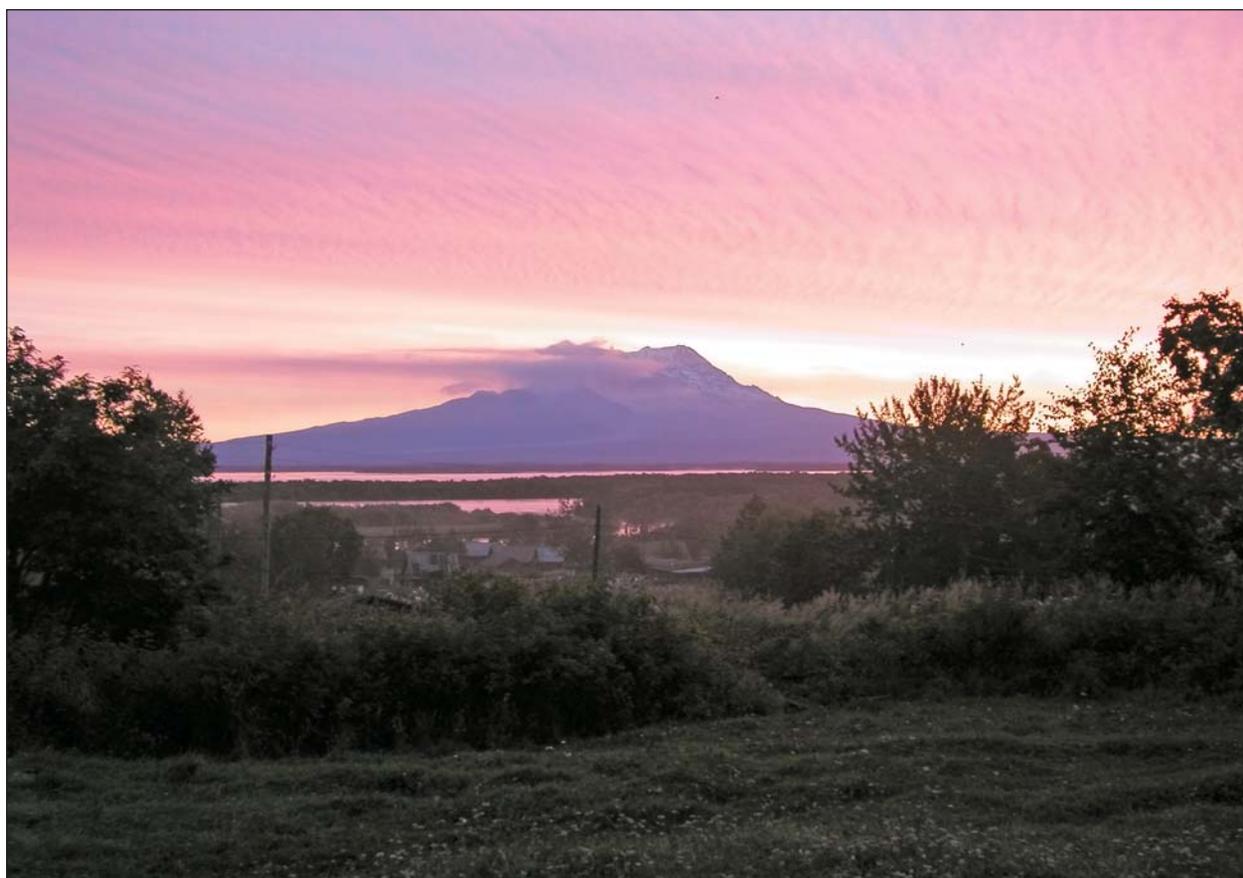
Вулкан Шивелуч\* — самый северный из действующих и один из высочайших (3395 м над ур.м.) вулканов полуострова. Конус сложен породами андезитового и андезито-базальтового состава.

Будучи одним из наиболее активных вулканов Камчатки, Шивелуч широко известен двумя своими катастрофическими извержениями (1854 и 1964 гг.), в результате каждого из которых на дневную поверхность было выброшено до 1 км<sup>3</sup> вулканических пород, уничтоживших десятки квадратных километров горных лесов и тундр.

В 1980 г. его деятельность вновь возобновилась: в кратере извержения 1964 г. началось формирование нового экструзивного купола\*\*. В апреле 1993 г. произошло первое мощное экспло-

\* Название вулкана происходит от ительменского слова Суелич — курящаяся гора.

\*\* Экструзия (купол вулканический) — тип извержений, свойственный вулканам с вязкой лавой. Выступающая вязкая лава нагромождается над устьем вулкана в виде куполов, из которых или около которых время от времени при сильных взрывах выделяются газы, дающие начало палящим тучам.



Вулкан Шивелуч — вид от Ключевской вулканологической станции.

живное извержение\* с формированием огромных эруптивных туч\*\*, больших пирокластических\*\*\* и грязевых потоков (лахаров) длиной до 8 и 28 км соответственно, прошедших по долинам сухих рек Байдарная и Каменская.

В период с 2001 по 2013 г. произошло еще пять подобных извержений, выбросы пепла (эруптивные колонны) поднимались на высоту от 5–8 до 13–15 км, а отложения пирокластических и грязевых потоков заполнили эрозионные каньоны сухих рек на южной части подножия вулкана. И в настоящее время на вулкане периодически происходит выброс газовой-пепловых туч на высоту от 3–5 до 8–12 км.

\* Эксплозивными называют извержения, при которых излияние лавы сопровождается взрывами, которые могут происходить одновременно с излияниями или чередоваться с ними. При взрывах выбрасывается огромное количество рыхлого вулканического материала.

\*\* Туча эруптивная — масса газов и твердых обломков, выброшенная взрывом из вулкана в виде облака.

\*\*\* Пирокластические — обломочные горные породы, образовавшиеся в результате накопления выброшенного во время извержения вулканов обломочного материала (вулканических брекчий, туфов и др.), а также отложений раскаленных туч и горячих лавин при вулканических извержениях.

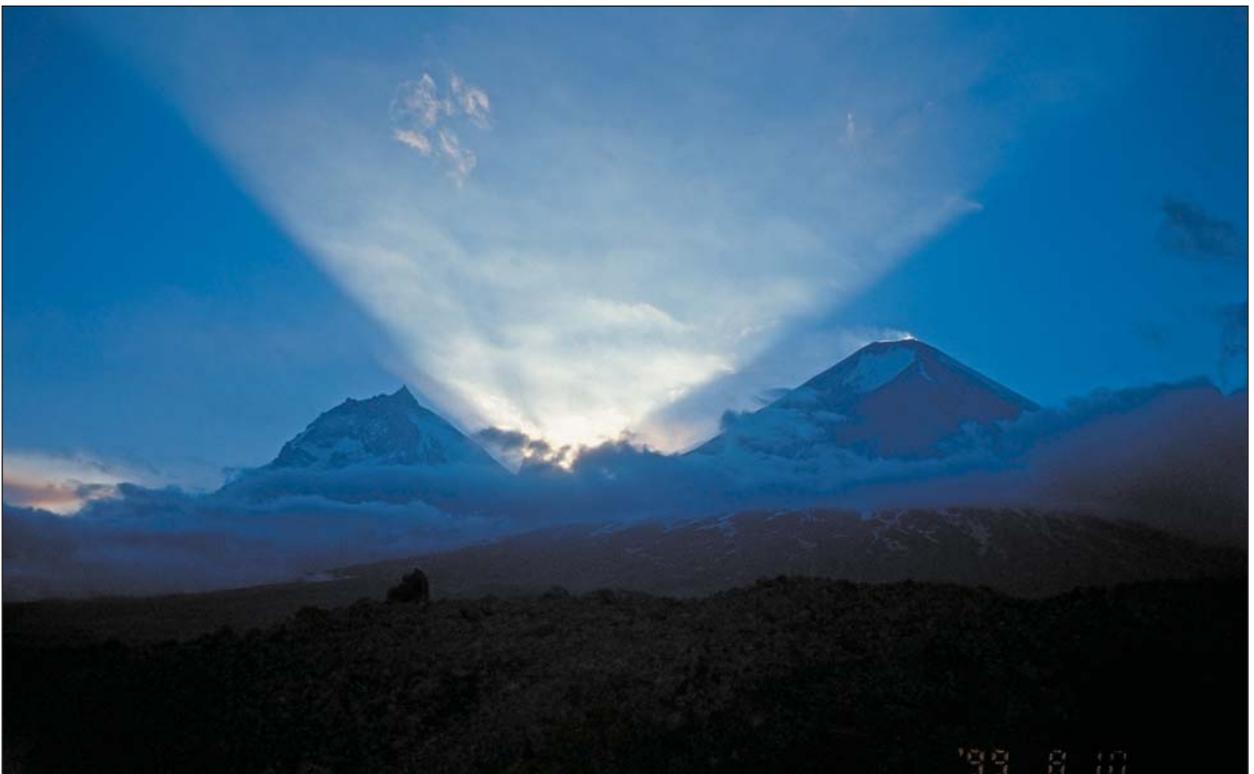
Вулкан Ключевской (Ключевская сопка, Камчатская гора) — один из самых активных вулканов мира. В среднем за год он поставляет на дневную поверхность 60 млн т изверженных вулканических продуктов, что составляет почти половину совокупного объема извержений всех 68–70 действующих вулканов Курило-Камчатской вулканической дуги. Это типичный стратовулкан\*\*\*\* правильной формы, сложенный базальтовыми лавовыми потоками, переслаиваемыми отложениями пирокластиков. А его вершинный кратер при глубине до 200–250 м достигает в поперечнике 700 м.

Еще совсем недавно Ключевской считался самым высоким (от 4750 до 4850 м, в зависимости от преобладания либо аккумулятивных, либо деструктивных процессов на его вершине в тот или иной период его жизни) действующим вулканом Евразии [1]. Однако поскольку исследования последних двух-трех десятков лет позволили отнести двуглавый Эльбрус (высота вершин 5642 и 5621 м) к активным вулканам [2], наш камчатский исполин уступил ему пальму первенства. Тем

\*\*\*\* Стратовулкан — вулкан, конус которого сложен чередующимися потоками затвердевшей лавы и ее обломками (глыбами, вулканическими бомбами, лапилями), сцементированными и превратившимися в туф.



Вулкан Ключевской (вид с запада) в стадии интенсивного выделения парогазовой смеси. Высота колонны над вершиной вулкана достигает 4–4.5 км.



Потухший вулкан Камень (абсолютная высота 4575 м) и вулкан Ключевской (справа). Редкостная форма заката. Снимок сделан от сейсмостанции Апохончич, расположенной к юго-востоку от вулкана.



Потухший стратовулкан Острый Толбачик, вид со стороны р.Студеной. Правее вулканической постройки располагается самостоятельная облачная «шапочка». Июль 2010 г.

не менее, по многим оценкам, он сохранил за собой звание самого большого на Земле правильного вулканического конуса. Особенно поражает, что образование этого конуса произошло всего за 7 тыс. лет.

Рядом с Ключевским расположен потухший вулкан Камень. Отличительная его морфологическая особенность — огромный цирк на юго-восточном склоне, образовавшийся вследствие либо грандиозного сейсмоструктурного обвала, либо столь же грандиозного направленного взрыва, либо совместного проявления обоих этих феноменов. В результате этого его высота понизилась примерно на 200–300 м.

Вулкан Острый Толбачик — в июле 2010 г. здесь наблюдалось интересное явление. Правее постройки потухшего стратовулкана Острый Толбачик (абсолютная высота вулкана 3682 м) образовалась самостоятельная облачная «шапочка». Не исключено, что ее образование было связано с поступлением в атмосферу тепла и пара из приповерхностного магматического очага готовящегося извержения. Во всяком случае, спустя полтора года именно к месту проекции центра данного облака на земную поверхность произошел разрыв горных пород, давший начало трещинному Толбачинскому извержению 2012–2013 гг.

В 11 км от вершины вулкана Плоский Толбачик располагались постройки так называемой базы



Вершина вулкана Острый Толбачик, вид с юга. Облачность скрадывает перспективу между передним и задним планами, и создается иллюзия «падения» вершины вулкана на зрителя.



Вулкан Острый Толбачик после первого снегопада. На переднем плане постройки базы «Ленинградская».

«Ленинградская», построенной в районе Песчаного урочища Толбачинского дола. Там на шлаковопепловых отложениях испытывались советские луноходы и марсоходы. В самом конце ноября — начале декабря 2012 г. это место было залито лавой, и в настоящее время мощность слоя остывшего лавового потока здесь достигает 3–5 м.



«Зеленый» закат над Толбачинским долом.

Отмечу, что камчатские вулканологи накануне этого извержения не стали публиковать в открытой печати официальный прогноз, ограничившись предупреждением в адрес соответствующих административных структур. И это оправдало себя полностью, ибо нетрудно представить, что многочисленные искатели «острых ощущений», узнав о прогнозе, буквально ринулись бы и на эту базу, и на сеймостанцию «Водопадная» с тем, чтобы остановиться там на постой. А шансов спастись, особенно в ночное время, от лавы, текущей в отдельных местах со скоростью до 2–3 м/с и более, у них были бы минимальными: лавовые потоки сначала отрезали базы от путей отступления, а затем подступили

и к самим строениям. Так что открытая публикация прогноза стихийного события — далеко не всегда благо.

Толбачинский дол — возвышенная вулканическая равнина, образованная за последние 10–11 тыс. лет в результате 70–90 извержений, приуроченных к Толбачинской региональной зоне ареального вулканизма, последние из которых произошли в 1975–1976 и 2012–2013 гг. Здесь мне удалось запечатлеть один из редчайших «зеленых» закатов. Этому оптическому явлению — так называемому зеленому лучу — краткой вспышке зеленого света, появляющейся в момент исчезновения солнечного диска за горизонтом или при его появлении из-за горизонта, даже посвящен одноименный роман Жюль Верна. Для наблюдения зеленого луча необходимы три условия: открытый горизонт (в степи, тундре, горах или на море в отсутствие волнений), чистый воздух и свободная от облаков сторона горизонта, где происходит заход или восход солнца. Обычная продолжительность зеленого луча всего несколько секунд.

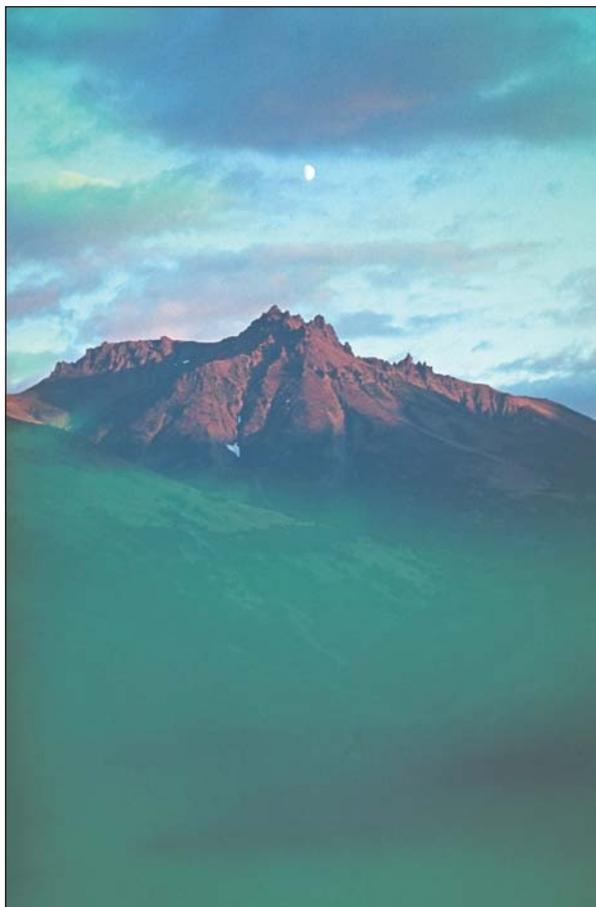
Необычный зеленый цвет высокой облачности и тумана мне довелось также сфотографировать на одной из экструзивных вершин древнего щитообразного вулкана Шапочка, огромная — до 20 км в поперечнике — постройка которого расчленена на несколько отдельных сегментов глубоко (до 400–600 м) врезанными троговыми долинами радиально растекающихся рек.

Зеленый туман надвигался от Охотского моря и перетекал через крутой привершинный гребень долины р.Уздач, устремляясь вниз и постепенно тая. Увы, фотография не передает динамику этого процесса. А жаль, так как зрелище было просто завораживающим, учитывая, что все это происходило в абсолютной предсумеречной тишине.

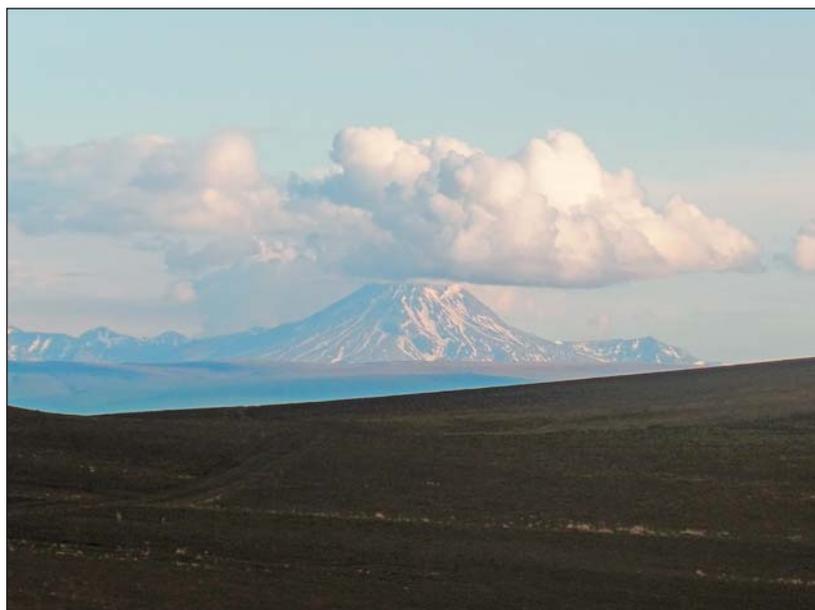
Вулкан Кизимен (абсолютная высота 2376 м) представляет собой сложную вулканическую постройку, не имеющую по своей морфологии точного аналога среди других вулканогенных образований Курило-Камчатской вулканической дуги [3]. Верхняя и средняя части его конуса образованы сочетанием самых разных по возрасту, вещественному составу, размеру, форме и сохранности лавовых потоков и экструзивных куполов с их мощными агломератовыми\* мантиями. Его подножие представлено крутонаклонными (8–10°) равнинами, сложенными в их верхней части обвальновзрывными толщами, и пологими (2–5°) обширными равнинами, заполненными отложениями пирокластических и грязевых потоков.

До извержения 2010 г. в основании крупного лавового купола в вершинной части вулкана функционировала мощная фумарола\*\*. Однако после начала извержения основная фумарольная активность оказалась приуроченной к вершинному кратеру. Именно с этой фумарольной деятельностью, с различной интенсивностью проявляемой во все последующие годы, и связано формирование мощного облака над вершиной вулкана, сфотографированного в 2015 г.

Облака в виде «шапочки» жители Петропавловска-Камчатского могут регулярно видеть и на своих, так сказать, «домашних вулканах», расположенных рядом с городом. Вулкан Корякский (абсолютная высота 3456 м, т.е. всего лишь на 200 м ниже знаменитого вулкана Фудзияма) относится к классическим стратовулканам. Он находится в стадии постепенного затухания активной деятельности, что подчеркивается формированием больших и глубоких барранкосов\*\*\*, придающих конусу вулкана ребристый облик. Корякский характеризуется редкими, преимущественно слабыми и умеренными по силе извержениями, последнее из которых происходило в 2008–2010 гг. Не ис-



Высокая зеленая облачность и зеленый туман над одной из вершин щитообразного вулкана Шапочка.



Формирование мощного облака над вершиной вулкана Кизимен связано с фумарольной деятельностью, проявляющейся в вершинном кратере с различной интенсивностью после извержения 2010 г. Снимок 2015 г.

\* Агломерат — скопление обломков, кусков, фрагментов горных и минеральных пород. Агломератовая мантия — грубые агломератовые туфы, сопровождающие экструзии вязких лав.

\*\* Фумарола — трещина или отверстие, располагающееся в кратерах, на склонах и у подножия вулканов и служащее источником горячих газов.

\*\*\* Барранкосы — глубокие овраги, прорезающие склоны вулканических конусов и расходящиеся радиально от кратера к подошве. Образуются как водой, стекающей по склонам, так и сухими лавинами, скатывающимися из кратера. Термин образован от испанского слова barranco — глубокий овраг.



Двойное облако над вершиной Авачинского вулкана. Видимая на снимке часть вулканической постройки (высотой более 2 км) позволяет судить о размерах этого атмосферного явления.

ключается, как считают вулканологи, что слабо расходуемая и потому постепенно накапливаемая в его магматическом очаге энергия может привести к такому же взрыву, что на соседнем Авачинском вулкане буквально «сорвал» вершину.

«Шапочка» из облаков регулярно появляется и над вулканом Авачинский (абсолютная высота 2741 м). Морфологически он представляет собой сложную вулканическую постройку типа Сомма-Везувий\*. Формирование ее было обусловлено тем, что 30 тыс. лет назад сейсмотектонический обвал, вкупе с мощнейшим направленным взрывом, снес вершинную часть правулкана Авача с образованием на ее месте кальдеры. В ней-то и образовался около 4 тыс. лет назад внутренний конус с относительной высотой до 700 м. Авачинский относится к числу самых активных вулканов Курило-Камчатской вулканической дуги. Последнее его извержение произошло в 1991 г. Образованию облаков над вулканом, принимающих подчас фантастические формы и размеры, способствует как деятельность двух мощных фумарол, приуроченных к восточной и западной кромкам его вершины, так и приближение теплого фронта очередного циклона.

Еще два «домашних» вулкана — Мутновский и Вилючинский — располагаются в окрестностях

города. В любое время года в хорошую погоду над четким зигзагом горной цепи, окаймляющей Авачинскую губу с юга, отчетливо прорисовывается белоснежная громада вулкана Мутновский (абсолютная высота 2324 м). За это доминирование над окружающими горами, а также за ослепительно белый столб пара, который нередко стоит над его вершиной и, как маяк, указывает кораблям поворот к Авачинской губе, вулкан, расположенный в 70 км к югу от Петропавловска-Камчатского, был прозван нашими предками сопкой Поворотной (или Сигнальной).

Что же касается происхождения вулкана, то его огромная постройка образовалась в результате слияния четырех самостоятельных стратовулканов, общая вершина которых занята большим (2.1×1.5 км) восьмеркообразным кратером. При этом высокая (от 50–70 до 200–250 м) и крутая кратерная стенка, окрашенная в темно-серые, лимонно-желтые и красно-оранжевые цвета, как драгоценная оправа, окаймляет ослепительно белый жемчуг снежников верхней части кратерного ледника и сверкающие, как аметист, ледопады, которые обрываются к дну его нижнего кратера. Это днище, вследствие проявления гидротермальной и фумарольной деятельности, изменения состояния атмосферы, а также времени суток и связанной с этим переменной освещенности, беспрестанно, подобно огромному опалу, меняет свое мерцание.

\* Вулкан двойной (типа Сомма-Везувий) — сооружение из молодого вулканического конуса, вложенного в разрушенную постройку более крупного древнего вулкана.



Два «домашних» вулкана — Мутновский (слева) и Вилучинский, над которыми видна резкая граница между сплошной мрачной облачностью и почти абсолютно чистым, хотя и в легкой дымке, небом.

Будучи одним из наиболее древних действующих вулканов полуострова, Мутновский в голоцене проявлял себя лишь редкими и слабыми эруптивными извержениями в виде выбросов так называемого резургентного (т.е. раздробленного в результате фреатического\* парогазового взрыва) материала его постройки. Последнее из таких извержений произошло в марте 2000 г.

Впрочем, эта «старческая хилость» вулкана с лихвой компенсируется его мощной фумарольной деятельностью, интенсивность которой (500 тыс. кал/с) в 150–200 раз превышает тепловую мощность любого из действующих вулканов Курило-Камчатского региона [2]. Гидротермальная и фумарольная деятельность приурочена к трем основным центрам: к активной воронке, над которой эпизодически появляется мощная газово-пепловая колонна, а также к верхнему и донному фумарольным полям.

Верхнее фумарольное поле представляет собой сглаженный выступ бывшего кратерного днища, поверхность которого буквально испещрена пестроцветными отложениями возгонов сернокислых солей алюминия, железа, кальция, магния, натрия и других элементов, приуроченных к десяткам разнообразных фумарол — от еле заметных струек до мощных струй с температурами до 305°C.

Поверхность донного поля за счет выхода многочисленных парогазовых струй прогревается от

20 до 110°C. В пасмурную погоду эта парогазовая смесь, прижимаясь к земле, придает замкнутому пространству поля облик «дантова ада» с его удушьящим сероводородным запахом. И все это дополняется разнообразным шумом. Гремит река, по дну которой волокутся камни, журчат многочисленные ручейки, свистят, как кипящие чайники, небольшие фумаролы, клокочут огромные, до 5–7 м в поперечнике, грязевые котлы. А иногда все это заглушает грохот обвалов или снежных лавин.

Но как резко все меняется в хорошую погоду! Ярко-желтые фумарольные площадки, белые султаны парогазовых струй, небольшие (от полуметра до нескольких метров в поперечнике) и мелкие (от первых сантиметров до десятков сантиметров) термальные озера, вода в которых имеет цвет от грязно-серого до желтого и оранжевого, начинают буквально светиться под лучами солнца. А выделяемый ими газ сносится ветерком, практически не оставляя после себя удушающего запаха.

Справа от Мутновского расположен еще один «домашний вулкан» — Вилучинский, именуемый в просторечии Вилучиком. Абсолютная высота его правильного, изрезанного барранкосами конуса относительно невелика (2175 м). Однако на фоне прилегающего низкогорья он смотрится очень эффектно.

Примечательность этого потухшего вулкана — большой эрозионный кулуар\*\*, расположенный

\* Фреатический взрыв — событие, при котором раскаленная магма вступает в контакт с большим количеством льда или воды. При этом происходит молниеносное испарение, приводящее к тепловому взрыву.

\*\* Кулуар — корытообразная или V-образная ложбина на крутом склоне горы, направленная по линии стока воды.

с обратной стороны от города. Там за долгие шесть зимних месяцев с частыми и мощными снегопадами и пургой образуется мощный снежник-перелеток. На нем горожане катаются на лыжах,

сноубордах и всем прочем вплоть до июля, а иногда и до августа, подъезжая сюда по дороге, ведущей к Верхне-Мутновской гидротермальной электростанции. ■

## Литература

1. Действующие вулканы Камчатки: В 2 т. Т.1. М., 1991. [Active Volcanoes of Kamchatka: In 2 volumes. V.1. Moscow, 1991. (In Russ.)]
2. Новейший и современный вулканизм на территории России. М., 2005. [The Latest and Modern Volcanism in the Territory of Russia. Moscow, 2005. (In Russ.)]
3. Двигало В.Н., Мелекестев И. А., Шевченко А.В., Свирид И.Ю. Извержение 2010–2012 гг. вулкана Кизимен — самое продуктивное (по данным дистанционных наблюдений) на Камчатке в начале XXI века. Ч.I. Этап 11.11.2010 — 11.12.2011 гг. Вулканология и сейсмология. 2013; 6: 3–21. [Dvigalo V.N., Melekestev I.A., Shevchenko A.V., Svirid I.Yu. Kizimen volcano 2010–2012 eruption — the Most Productive Eruption (according to remote observations) in Kamchatka at the Beginning of the 21st Century. Pt.I. Stage 11.11.2010 — 11.12.2011. Journal of Volcanology and Seismology. 2013; 6: 3–21. (In Russ.)]

## Volcanoes and Clouds

V.E.Bykasov

*Institute of Volcanology and Seismology, Far-Eastern Branch of RAS (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation)*

Volcanoes during eruptions are a magnificent and fascinating show. But while quiet, they are also a great scene for the photograph. Towering at kilometers over neighboring dales and mountains, volcanoes not just attract usual overcast, but also are its generators themselves. Heated-up air of the adjacent plains gradually cools down, while rising up the volcanic slopes. Concurrently, unusual near lunchtime, the containing water vapor begins condensing and forms the local center of overcast around the volcanic construction. Some shots of the amazing atmospheric phenomena over several Kamchatka volcanoes (Shiveluch, Klyuchevskoy, Kamen', Ostry Tolbachik, Shapochka, Koryak, Avacha, Mutnovsky and Vilyuchinsky) happened to be taken.

**Key words:** Kamchatka, volcanoes, eruptions, unusual atmospheric phenomena.

# ПРИРОДА

Ответственный секретарь  
**Е.А.КУДРЯШОВА**

Литературный редактор  
**Е.Е.ЖУКОВА**

Научные редакторы  
**М.Б.БУРЗИН**

Художественный редактор  
**Т.К.ТАКТАШОВА**

**Т.С.КЛЮВИТКИНА**

Заведующая редакцией  
**И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА**

**К.Л.СОРОКИНА**

**Н.В.УЛЬЯНОВА**

Перевод содержания  
**А.О.ЯКИМЕНКО**

**М.Е.ХАЛИЗЕВА**

**О.И.ШУТОВА**

**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 25.07.2017  
Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная. Цифровая печать  
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2  
Тираж 310 экз. Заказ 1318  
Цена свободная

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

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

в следующем номере



Рифтовая долина — ключевая структура дна океана. Здесь образуется земная кора и начинается ее развитие. Удивительно, но всего несколько десятилетий назад большинство геологов о рифтовой долине не подозревали. У других были смутные догадки, которые сводились к возможному продолжению рифта Исландии в океан или к взаимосвязи с концепцией расширения Земли. Точкой отсчета в обоих случаях служил уже известный к тому времени глобальный пояс землетрясений, занимающий в океанах срединное положение. Но наглядного изображения продольного ущелья, разделяющего срединные хребты, по-прежнему не существовало.

Изучение рифтовых долин — залог фундаментальных знаний о земной коре дна океана и ее глубинном строении. Рифтовая долина, как река животворящая, рождает новую жизнь с несметным разнообразием существ, которые получают пропитание не сверху, а из глубин литосферы — благодаря постоянно действующему источнику энергии, функционирующему миллионы лет.

**Ильин А.В.** РИФТОВАЯ ДОЛИНА — НАЧАЛО ВСЕХ НАЧАЛ  
В ГЕОЛОГИИ ДНА ОКЕАНА

