

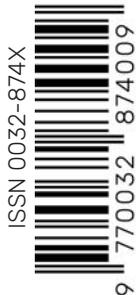
# ПРИРОДА

8 2019

*Для человека животные одного вида очень похожи — практически на одно лицо. Можем ли мы узнавать животных, виденных нами прежде, по их внешним чертам?*

**УЗНАЙ МЕНЯ, ЕСЛИ СМОЖЕШЬ:  
ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОРЖЕЙ**

**С.20**



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.Батулин**, 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.Черноустько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Моржиха Диана в Московском зоопарке. 2003 г. См. в номере: **Н.В.Крюкова**. *Узнай меня, если сможешь: возможности идентификации моржей.*

Фото А.Шеремета



ПРАВИТЕЛЬСТВО  
МОСКВЫ



МИНИСТЕРСТВО  
НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ



МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА



РОССИЙСКАЯ  
АКАДЕМИЯ  
НАУК



Организация  
Объединения Наций по  
вопросам образования,  
науки и культуры



2019 год  
Международный год  
Периодической  
таблицы химических  
элементов

# ВСЕРОССИЙСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ НАУКИ НАУКА + МОСКВА 11-13 ОКТЯБРЯ



ТЕМА 2019 ГОДА

**150 ЛЕТ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ  
ТАБЛИЦЕ ХИМИЧЕСКИХ  
ЭЛЕМЕНТОВ**

-  МГУ
-  ЦВК ЭКСПОЦЕНТР
-  РАН
-  ЗАРЯДЬЕ
-  МЦКО  
МОСКОВСКИЙ ЦЕНТР  
КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ
-  **90 ПЛОЩАДОК**  
ПО ГОРОДУ НА БАЗЕ ВУЗОВ,  
МУЗЕЕВ, НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ,  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

# 0+

## ВХОД СВОБОДНЫЙ

**FESTIVALNAUKI.RU**

РЕКЛАМА

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ ПАРТНЕРЫ



ПАРТНЕРЫ





## Издательство “Наука” оказывает услуги:

- СОЗДАНИЕ ОРИГИНАЛ-МАКЕТА
  - редактирование
  - вёрстка
  - изготовление рисунков
- ХУДОЖЕСТВЕННОЕ ОФОРМЛЕНИЕ
- ВЕСЬ КОМПЛЕКС ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ УСЛУГ
- РАСПРОСТРАНЕНИЕ В РОЗНИЧНОЙ СЕТИ “АКАДЕМКНИГА”

**Высокопрофессиональные специалисты “Науки”  
готовы к сотрудничеству**

**[naukapublishers.ru](http://naukapublishers.ru)**

Тел.: +7 (495) 276-7735

## В НОМЕРЕ:

---

**3** Интервью с Е.А.Гудилиным

**Люди, создающие новые материалы:  
от поколения X до поколения Z**

---

**15** Е.Г.Мирлин, Л.В.Оганесян

**Исчерпание химических элементов  
в земной коре: обоснованна ли тревога?**

Основа растущей тревоги заключается в непоправимом ущербе природной среде, который наносит человек, извлекая во все возрастающем количестве из земной коры химические элементы и вовлекая их в свою деятельность.

---

**20** Н.В.Крюкова

**Узнай меня, если сможешь:  
возможности идентификации моржей**

Мы без труда узнаем человека, ориентируясь на черты лица, манеру движения и голос, и после кратковременной встречи с незнакомцем можем по памяти восстановить и описать его образ. С животными ситуация более сложная: для человека особи одного вида очень похожи — так сказать, на одно лицо. Можем ли мы узнавать животных, виденных нами прежде, по их внешним чертам?

---

**30** О.Н.Попова

**Стрекозы — мост между водными  
и наземными экосистемами**

**К 70-летию со дня рождения А.Ю.Харитонова**  
Известно, что возврат многих химических элементов из водоемов на сушу осуществляют полуводные (амфибионтные) насекомые, при этом роль стрекоз была недооценена. Между тем, они оказались чуть ли не самыми главными проводниками водной продукции в лесостепную экосистему. Статья основана на 30-летних исследованиях, которые велись в Барабинской лесостепи (Западная Сибирь, Россия) под руководством профессора А.Ю.Харитонова (1949–2013).

---

---

**44** Д.А.Боброва, Е.Н.Казакова, Н.А.Казаков  
**Опасные «нелавиноопасные» склоны**

Бывают ли нелавиноопасные склоны? Считается, что да. Например, невысокие или покрытые лесом. Но и с них нередко сходят лавины, в которых гибнут люди. Как предотвратить такие случаи? И какие склоны все-таки нужно считать опасными?

---

---

**54** В.Г.Ильичёв, Л.В.Дашкевич, В.В.Кулыгин  
**Фитоценозы Азовского моря  
и климатические изменения**

Новая эколого-эволюционная модель роста водорослей, в которой происходит одновременное изменение переменных и параметров, имитирует эволюционный процесс, имеет небольшую размерность и обладает высоким быстродействием. С ее помощью попробуем проанализировать, как изменятся фитоценозы Азовского моря в случае потепления климата.

---

---

## **63 НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ**

Н.Б.Келлер, Ю.А.Зарайская

**Глубоководные склерактиниевые  
кораллы — обитатели гайотов**

---

**68** А.Ю.Панчин

**Волосатики и степени свободы  
в эволюции белков**

---

**74** А.И.Лебединцев

**Амулет древних морских зверобоев  
с побережья Охотского моря**

---

---

## **77 НЕКРОЛОГ**

В.М.Липунов

**Предел Кардашёва**

---

## CONTENTS:

---

**3** Interview with E.A.Gudilin

**People Creating New Materials:  
from Generation X to Generation Z**

---

**15** E.G.Mirlin, L.V.Oganesian

**Exhaustion of Chemical Elements in the  
Earth's Crust: Is Anxiety Reasonable?**

Growing anxiety bases on the irreparable damage to the natural environment that humanity causes by increasing extracting of chemical elements of the Earth's crust and by involving them in their activities

---

**20** N.V.Kryukova

**Know Me, If You Can:  
Opportunities of the Identification of Walruses**

We can easily recognize a person based on facial features, manner of movement, and voice. After a short meeting with a stranger, we can recall and describe his image from our memory. However, the situation with animals is more complicated: for a person, individuals of one species are very similar, as like as two peas. Can we recognize the animals we have seen before by their external features?

---

**30** O.N.Popova

**Odonates are a Bridge between Aquatic  
and Terrestrial Ecosystems  
On the 70th Anniversary of A.Yu.Haritonov**

It is known that the return of many chemical elements from water to terrestrial ecosystems is carried out by semi-aquatic (amphibiotic) insects, although, the role of odonates was underestimated. Meanwhile, they appeared to be almost the most important vital conduit of aquatic production to forest-steppe ecosystem. The article is based on 30-year studies conducted in the Barabinsk forest-steppe (Western Siberia, Russia) under the leadership of A.Yu.Haritonov (1949–2013).

---

---

**44** D.A.Bobrova, E.N.Kazakova, N.A.Kazakov

**Dangerous «Non-Avalanche» Slopes**

Are there non-avalanche slopes? It is believed that yes. For example, low slopes or covered with forest. But even on such slopes avalanches, in which people die, often happened. How to prevent such cases? And which slopes still need to be considered dangerous?

---

**54** V.G.Il'ichev, L.V.Dashkevich, V.V.Kulygin

**Azov Sea Phytocenoses and Climate Changes**

Proposed new ecological and evolutionary model of algae growth, in which there is a simultaneous change in variables and parameters, imitates the evolutionary process, has a small dimension and a high speed. With its help, we will try to analyze how the phytocenoses of the Sea of Azov will change in the event of climate warming.

---

## **63 SCIENTIFIC COMMUNICATIONS**

N.B.Keller, Yu.A.Zarayskaya

**Guyot Deep-Sea Scleractinian Corals**

---

**68** A.Yu.Panchin

**Hairworms and Degrees of Freedom  
in Evolution of Proteins**

---

**74** A.I.Lebedintsev

**Amulet of Ancient Marine Hunters  
from the Coast of the Sea of Okhotsk**

---

## **77 OBITUARY**

V.M.Lipunov

**Kardashev's Limit**

---

# Люди, создающие новые материалы: от поколения X до поколения Z

Интервью с членом-корреспондентом РАН Е.А.Гудилиным

Факультет наук о материалах Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

**С**амые диковинные экспонаты научной выставки, организованной в Москве в честь Международного года Периодической таблицы химических элементов в феврале 2019 г., можно было рассмотреть только «вооруженным глазом»: Таблица Д.И.Менделеева размером  $5.0 \times 8.7$  мкм и нанопортрет первооткрывателя периодического закона великолепно демонстрировали возможности динамической АСМ-литографии на сканирующем зондовом микроскопе. Миниатюрные произведения представили юные участники творческих конкурсов XII Всероссийской олимпиады по нанотехнологиям, когда-то задуманной академиком Ю.Д.Третьяковым — основателем факультета наук о материалах (ФНМ) Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. О том, как подобное взаимодействие со школьниками и студентами помогает сохранить своеобразие факультета и почему невозможно воплотить идею междисциплинарного естественнонаучного образования, относясь к обучению как к конвейеру, редактору журнала «Природа» рассказал заместитель декана ФНМ член-корреспондент РАН Е.А.Гудилин.

**Евгений Алексеевич, какие задачи поставлены перед факультетом наук о материалах с момента его создания? Чем определяется индивидуальность ФНМ в ряду естественнонаучных факультетов МГУ?**

Факультет наук о материалах существует уже 28 лет, он служит трамплином для создания научных школ в области фундаментального материаловедения, химии и наук о материалах. Эти школы объединяют очень разные поколения исследователей — и людей, пришедших в науку в 1960–1980-е годы, и так называемых миллениалов, и поколение современных студентов и аспирантов, которые еще только делают свои первые шаги в профессии.

История создания и становления факультета наук о материалах связана с именем крупного российского химика академика Юрия Дмитриевича Третьякова (1931–2012). Он хотел воплотить в жизнь идею естественнонаучного образования



Е.А.Гудилин.

на стыке химии, физики и математики, и при поддержке ректора Московского государственного университета Виктора Антоновича Садовниченко, при участии химического, физического, механико-математического факультетов в 1991 г. была создана новая структурная единица МГУ — колледж наук о материалах. (Собственно, с этого момента ФНМ и отсчитывает свою историю: слово «колледж» исчезло из его названия при переименовании в 1999 г.)

Первый декан выстроил систему междисциплинарного обучения, которое меняет менталитет студентов, расширяет их кругозор: Юрий Дмитриевич стремился к тому, чтобы молодые люди были готовы оперативно воспринимать новые тенденции в разных естественнонаучных областях. И ключевым направлением Третьяков считал создание новых материалов. Он долгое время работал на кафедре химической технологии химического факультета МГУ (впоследствии завел кафедру неорганической химии), и это



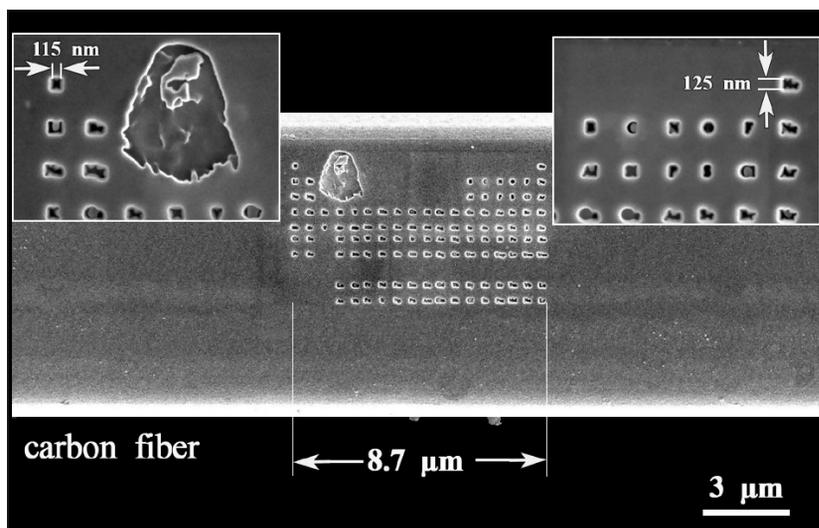
Всемирно известный ученый в области солнечной энергетики М.Гретцель (Федеральный институт технологии, Швейцария), заведующий лабораторией новых материалов для солнечной энергетики ФНМ, кандидат химических наук А.Б.Тарасов (справа) и научный сотрудник той же лаборатории, аспирант ФНМ А.А.Петров (слева) на стенде ФНМ на Фестивале науки 2018 года.

позволило ему увидеть в отечественной системе образования один существенный пробел. В Европе всегда развивались факультеты типа «materials science and engineering», их отличительная черта — прагматизм, который несвойствен отечественному университетскому образованию. И хотя в ряде вузов — например, в Российском

химико-технологическом университете имени Д.И.Менделеева, в Московском институте стали и сплавов — развивались инженерные направления, связанные с получением новых материалов, Третьяков считал: нужно соединить классическое университетское образование (умение учиться новому) и практику научной работы по созданию,

аттестации и последующему внедрению новых материалов и наноматериалов, и тогда возникнет синергизм, выпускники будут способны реализовывать проекты от идеи до ее практического воплощения.

С 2012 г. факультет возглавляет академик Константин Александрович Солнцев, научный руководитель Института металлургии и материаловедения имени А.А.Байкова РАН. Константин Александрович принадлежит к яркой плеяде ученых, обладающих огромным практическим опытом и превосходно знающих, как важно сохранять и развивать междисциплинарный характер фундаментального химического материаловедения — именно этот принцип «исповедует» ФНМ.



Микрофотография углеродного волокна толщиной 10 мкм с насеченной Таблицей химических элементов Д.И.Менделеева. Размер отдельных букв на фотографии ~100–150 нм; carbon fiber — углеродное волокно, μm — мкм. Авторы: Н.А.Архарова, А.С.Орехов (Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» имени А.В. Шубникова РАН).



Коллектив лаборатории новых материалов для солнечной энергетики ФНМ у памятной доски, установленной на химическом факультете МГУ в честь основателя и первого декана ФНМ академика Ю.Д.Третьякова. В центре — руководитель этой молодежной лаборатории, выпускник ФНМ А.Б.Тарасов, лауреат Премии Правительства Москвы для молодых ученых и Золотой медали РАН для молодых ученых. Лаборатория первой на ФНМ получила мегагрант Российского научного фонда для создания элементов новых поколений солнечных батарей. Фото А.Гришко (ФНМ).

**Ровно двадцать лет назад в нашем журнале вышла статья о «левитирующих» материалах\*, написанная Вами в соавторстве с Ю.Д.Третьяковым. Изучение веществ, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью, было тогда одной из ведущих тем на ФНМ?**

Научная школа Третьякова, ставшая основой нашего факультета, в то время была ориентирована на высокотемпературную сверхпроводимость. Юрий Дмитриевич хотел, чтобы выпускник ФНМ мог синтезировать не некое абстрактное вещество, а материал, имеющий практическое значение, чтобы ученый прогнозировал будущий успех и имел желание внедрить свою разработку. Однако с внедрением инноваций в нашей стране до сих пор не все гладко.

**Обычно ученые, работающие в области фундаментальных исследований, подчеркивают различие между своими занятиями и сферой практического применения открытий.**

Время изменилось: молодые ученые, наоборот, думают о том, как внедрить продукт своего интеллектуального труда; и это определенно плод тех

семян, которые посеял первый декан факультета наук о материалах.

Декан К.А.Солнцев сохранил традиции ФНМ, развиваются и новые направления междисциплинарных исследований — в первую очередь, связан-



Академик Ю.Д.Третьяков.

\* Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. Синтез «левитирующих» ВТСП-материалов: от фантастики к реальности // Природа. 1999. №7. С.13–25.



Ректор МГУ имени М.В.Ломоносова академик В.А.Садовничий и первый декан факультета наук о материалах академик Ю.Д.Третьяков на церемонии закрытия III Всероссийской олимпиады «Нанотехнологии — прорыв в будущее», 2009 г. Фигурка гнома в руках ректора — символ наноолимпиады: в переводе с греческого «нано» обозначает «карлик», «гном».

ные с материалами для энергетики, которые получают с помощью окислительного конструирования. Продолжается разработка оригинальных био-керамик и материалов для медицинской диагностики. В этой области мы сотрудничаем с кафедрой биофизики биологического факультета МГУ, которой заведует член-корреспондент РАН Андрей Борисович Рубин. Манипулирование молекулярными машинами, изучение тонких механизмов про-



Декан факультета наук о материалах МГУ имени М.В.Ломоносова академик К.А.Солнцев на закрытии XI Всероссийской олимпиады «Нанотехнологии — прорыв в будущее», 2017 г.

цесса фотосинтеза, адресная доставка лекарств непосредственно в клетку, пораженную заболеванием, — темы, требующие участия ученых разной специализации. А для плодотворного междисциплинарного взаимодействия нужна высокая степень взаимопонимания, что непросто, учитывая различия менталитета и научной специализации биологов и химиков-материаловедов. Мы с коллегами говорим теперь на едином языке, но шли к этому около пяти лет.

### **Понадобилось взаимное погружение в профессиональную языковую среду?**

Мы проводили совместные семинары, писали вместе статьи, просто общались. Предложите «чистому» химику и биологу пообщаться между собой на профессиональные темы (без предварительной подготовки), и увидите — они не поймут друг друга: причиной тому — монопредметная специализация.

### **По-видимому, сотрудничество с биофизиками и другие межфакультетские научные проекты помогают адаптировать программу работы со студентами, приблизиться к оптимальному варианту обучения специалистов, способных вести междисциплинарные исследования?**

Мы нашли, как нам представляется, верный подход к обучению на ФНМ, но понимаем, что программа не может быть статичной. Нельзя оставаться в рамках единой схемы бесконечно, ведь постоянно сокращается дистанция между получением исследователем диплома об образовании и появлением его новых разработок, уменьшается время от момента открытия новых материалов до их практического внедрения (с 20–40 лет в начале 2000-х годов до 10–15 в настоящее время).

Третьяков любил рисовать следующий график. Научное открытие приводит к кратковременному всплеску общественного интереса к теме работы ученого (этим мы обязаны волне преувеличенных слухов, размноженных средствами массовой информации и подхваченных обывателями в ожидании манны небесной здесь и сейчас). Затем интерес спадает, причем иногда кривая внимания к этим исследованиям уходит в область неприятия и отрицания обществом просто оттого, что золотые горы не выросли мгновенно. Зато потом начи-



культетов. Это случается довольно часто, и это тоже стало традицией.

**Продолжая литературные аналогии, факультет наук о материалах можно сравнить с Царскосельским лицеем: так же, как когда-то в этом знаменитом лицее, у вас очень небольшой набор на первый курс, вы пестуете каждого своего студента. А, как известно, если вкладываться в учеников, наградой становятся мощные всходы. ФНМ развивается почти 30 лет. Как Вы оцениваете результат работы?**

Если вы посмотрите имена тех, кто получает премии правительства Москвы за достижения в области химии и наук о материалах, премии Европейской академии наук для молодых ученых, другие престижные награды, то убедитесь: большая часть — наши выпускники. Третьяков называл факультет наук о материалах элитным, вкладывая именно тот, «царскосельско-лицейский», смысл: интеллектуальный вклад в каждого нашего студента очень велик. Это правда — мы очень много занимаемся со своими студентами: у каждого из них есть куратор, научный куратор и т.д.

**И потом молодой человек уходит на другой факультет...**

Спокойно относиться к этому — кредо факультета. В будущем мы могли бы увеличить набор, если на ФНМ откроется новая магистерская программа по биоматериалам, что обсуждается сей-

час на уровне руководства факультета. Но даже если ФНМ станет более многочисленным, выстраивать стандартный образовательный конвейер никто не будет.

**Вы рассказали о раннем приобщении студентов к серьезным исследованиям. Но, согласно традиции, школяр сначала должен накопить знания, постепенно его кругозор позволяет критически переосмысливать получаемые факты, и только после этого он может стать творцом чего-то принципиально нового. Можно ли ожидать реальных результатов от молодого человека, которому сразу предоставляется возможность очутиться на вершине творчества?**

Завоевывать вершины надо вовремя. Практика показывает, что к моменту распределения на кафедры получившие определенный багаж знаний, но оторванные от практики студенты четвертого курса уже утратили задор, их мотивация ослабела. Идея о том, что наиболее восприимчивы к новому молодые люди — вчерашние школьники, — совершенно правильная.

Молодой человек, пришедший на факультет наук о материалах, так уж устроен: ему необходим эксперимент — это свойство людей естественнонаучного склада. И к тому же вчерашний школьник сохранил любопытство. Если ему доверить работу, которой на практике никто еще не делал, это побуждает его к самообразованию.

Работая со студентами химического факультета на рубеже 1980–1990-х годов (кстати, в их числе была и наша 12-я группа материаловедов, бывшая группа радиохимии), Третьяков убедился, что у студентов возникает огромная мотивация не просто расширить свои теоретические знания, но глубоко разобраться в предмете, если они начинают заниматься серьезными исследованиями вместе с коллегами, уже состоявшимися в профессии. Меня и моих однокурсников распределяли на научную работу в лаборатории начиная с первого года обучения. 12-я группа объединила очень интересных людей, которые шли учиться на химический факультет сознательно и были очень заинтересованы в эксперименте. Тогда еще не существовало ФНМ, программа обучения была традиционной, но, как только нам, студентам,



Президент РАН А.М.Сергеев и выпускница аспирантуры факультета наук о материалах МГУ имени М.В.Ломоносова А.А.Семенова, ассистент кафедры наноматериалов ФНМ, удостоенная Премии Правительства Москвы для молодых ученых за 2017 г. Фото предоставлено пресс-службой МГУ.

доверили серьезную работу, это повысило нашу мотивацию, несмотря на полное отсутствие материальных стимулов (в 1990-е годы для них не было финансовых возможностей).

### Где работают выпускники ФНМ?

Сейчас нет трудностей с распределением. Специалисты с дипломом факультета наук о материалах есть везде — и в отечественных промышленных компаниях, и в зарубежных, и в органах управления, и в академических институтах. Среди выпускников ФНМ немало выдающихся людей, и посвятивших себя науке больше, чем ушедших в другие сферы деятельности. Несколько лет назад статья об этом была опубликована на портале «Нанометр»\*, который освещает разные темы, связанные с жизнью профессионального сообщества. Наши студенты ездят на стажировки к выпускникам прошлых лет. Сейчас ситуация такова: студенты младших курсов видят, что интеллект ценится, и сами ищут компании высокотехнологического профиля. В МГУ остаться, к сожалению, все не могут.

Хорошая идея для недалекого уже будущего — создать попечительский совет ФНМ, задача которого не только повышать реноме факультета, но и помогать в трудоустройстве выпускников.

### Вы упомянули портал «Нанометр», созданный при участии ФНМ в 2007 г. В том же году факультет наук о материалах впервые провел теперь уже традиционную Всероссийскую междисциплинарную олимпиаду «Нанотехнологии — прорыв в будущее!». Какую цель ставили в связи с этими начинаниями?

Мы рассматривали «Нанометр» как своего рода пилотню против лженауки. И первоначально, составляя задания олимпиады и публикуя их на портале, ориентировались на студентов. Только через несколько лет проведения такой работы стало ясно, что нужно вовлекать и школьников. Тогда в ректорате МГУ олимпиадное движение курировал Никита Юрьевич Анисимов — ныне ректор Дальневосточного федерального университета. Мы старались совместно совершенствовать дистанционную часть олимпиады, для этого прекрасно служил портал «Нанометр». По существу наш эксперимент и опыт стали основой для разработки регламента других олимпиад, которых сейчас много. Теперь многие вещи забюрократизированы в связи с льготами для поступления в вуз, наноолимпиада стала в целом технологичнее и суше, хотя мы все же оставили помимо обязательных конкурсов много творческих — в том числе для молодых ученых, тьюторов, учеников младших

классов, школьников, желающих подготовить и защитить собственный проект.

Вообще в рамках олимпиады по нанотехнологиям было много экспериментов. Например, конкурс научно-популярных статей «Просто о сложном» (в 2019 г. работы победителей публикуются в научно-популярном журнале «Наука и жизнь») в прошлые годы проводился несколько иначе, чем сейчас: на заключительном этапе участников заслушивали школьники — участники олимпиады, и мы распределяли премии на основе их голосования. Исходили из того, что возрастная дистанция лектора и слушателя должна быть минимальна. Оказалось, школьники оценивают значительно жестче, чем взрослое жюри.

Составители заданий наноолимпиады обычно не профессиональные педагоги, а молодые сотрудники ФНМ, химического, физического, биологического факультетов МГУ, и у них есть желание рассказать, над чем они ломают голову в своих научных исследованиях: тогда задача становится нестандартной, более интересной, но и более сложной. Зачастую учителя ее решить не могут, а школьники прекрасно справляются.

### Почему некоторые задачи олимпиады по нанотехнологиям оказываются слишком сложными для взрослых?

Исключительно из-за догматического подхода к решению. У молодых же людей проявляется нестандартное мышление. В одной из олимпиад мы сделали несколько задач, которые помогают почувствовать, что такое размер нано, и включили их в интернет-тур. В ответ — вал звонков от преподавателей с вопросами, на которые ребята нашли ответы сами. В частности, мы просили разобрать скелет школьника на чешуйки гидроксилпатита, которые в нем содержатся, и выложить их монослоем. Многие школьники вычислили правильный ответ: по площади это будет эквивалентно примерно 10 стадионам «Лужники».

Тот, кто боится мыслить нестандартно, к нам не приходит.

### Междисциплинарная олимпиада — нелегкий труд для организаторов. При этом вы не можете быть уверены, что призы выберут факультет наук о материалах, а не биофак или химфак. И все же ФНМ берет на себя проведение наноолимпиады. Почему?

Мы ищем особых людей, с которыми будем работать. Что же касается выбора факультетов победителями и призерами междисциплинарной олимпиады, то наша принципиальная позиция такова: факультеты МГУ сотрудничают, это нормальный синергизм, школьники поступают на самые разные факультеты нашего университета и других ву-

\* Гудилин Е.А. Факультет наук о материалах ([www.nanometer.ru/2009/07/02/material\\_science\\_division\\_156098.html](http://www.nanometer.ru/2009/07/02/material_science_division_156098.html)).



Заместитель председателя оргкомитета XIII Всероссийской олимпиады «Нанотехнологии — прорыв в будущее», декан ФНМ академик РАН К.А.Солнцев и победители по комплексу предметов: В.Киреев (Санкт-Петербург), А.Скомотина (Москва), С.Кошелев (Москва), Д.Пиров (Душанбе), Д.Панасенко (Москва), К.Козлов (Москва), А.Капелюшников (Москва). 2019 г.

Фото О.Маланкиной

зов, ведь наноолимпиада — олимпиада высшего уровня по классификации Российского совета олимпиад школьников.

После завершения XIII Всероссийской олимпиады «Нанотехнологии — прорыв в будущее» 2018/19 г. мы провели опрос ее участников и неожиданно установили, что они значительно меньше вовлечены в общение через социальные сети, нежели большинство школьников. Это тоже представители поколения Z, но необычные. Они иначе реагируют на мир, пытаются разобраться в сути вещей. Если вы сравните поведение школьников, пришедших писать очный тур наноолимпиады, и собравшихся в Большой химической аудитории на тотальный химический диктант, то сразу заметите, как различается их реакция на вопросы: первые взрослее и ответственнее, в их глазах неподдельный интерес, вторые ищут развлекательную форму, но не содержание, как это принято сейчас в нашем информационном мире миллениалов и поколения Z. К сожалению, спектакли в виде научного слэма, стендапа, хакатона и многих других форм (для них не нашлось нормальных названий на языке Пушкина и Лермонтова) становятся все более популярными. В принципе, и это неплохо, но организаторам не надо забывать, что кроме формы есть еще и содержание, за которым —

ромный труд. И без этого труда не бывает радости творчества и великих открытий.

**Среди одиннадцатиклассников, победивших в наноолимпиаде 2018/19 г., едва ли не половина — мальчики из Душанбе. Чем объясняется столь высокий результат таджикских школьников?**

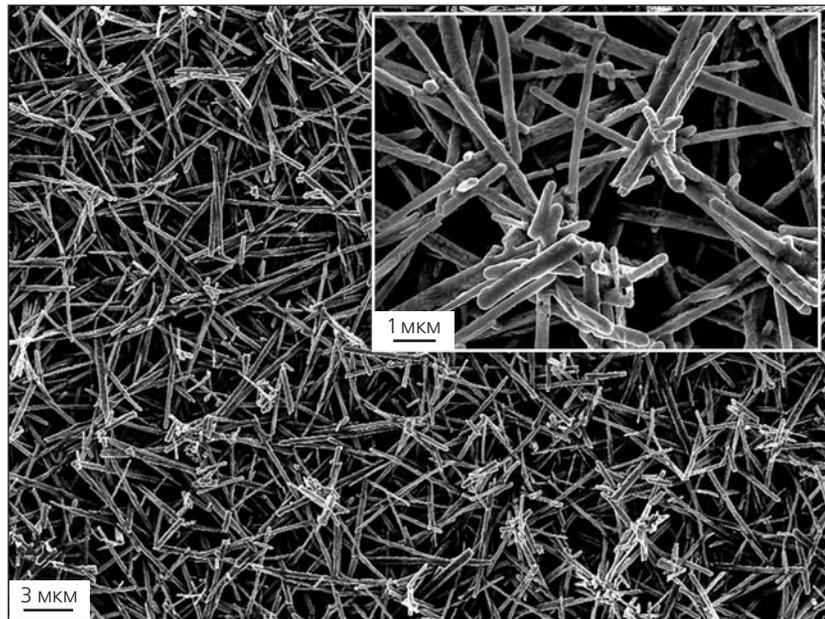
Это ученики частной школы, в которой работают сильные учителя. Ребятам специально готовят к поступлению на химический факультет в филиал МГУ имени М.В.Ломоносова в Душанбе. Мы много лет работаем с этой школой.

**В 2019 г. стартовал новый проект Российской академии наук и Министерства просвещения РФ по курированию базовых школ РАН\*. Вы знакомы с этой работой?**

Я знаю о проекте, но мне неизвестна программа его реализации. По-видимому, аналогичный пример — программа столичного правительства «Академический класс в московской школе»: около 10 школ получают возможность ведения проектной деятельности своих учеников на базе инсти-

\* См.: Хохлов А.Р. Век науки о полимерах // Природа. 2019. №3. С.3–7.

тутов РАН, им читают популярные лекции, организуют экскурсии, конференции. Определенная польза от подобных программ есть — расширяется кругозор детей. Думаю, что выступления профессоров РАН с лекциями в базовых школах могут мотивировать школьников, склонных к занятиям наукой, поступать в вузы. Но, насколько я понимаю, в упомянутом проекте РАН и Министерства просвещения РФ не заложена определенная связь с вузами, а между тем без звена высшей школы тут невозможно обойтись. Было бы разумно заключить тройственные соглашения: школы, вузы, РАН. Ведь в действительности намечается работа с учителями, и в значительно большей степени, чем со школьниками. Опыт такого взаимодействия имеет наш факультет и, например, химический факультет МГУ, где проводятся практикумы с учениками школ, причем не только московских.



Картирование нитевидных кристаллов гибридного йодоплюмбатового перовскита — фото из статьи сотрудников лаборатории новых материалов для солнечной энергетики ФНМ (А.А.Петров, N.Pellet, J.-Y.Seo, N.A.Belich, D.Y.Kovalev, A.V.Shevelkov, E.A.Goodilin, S.M.Zakeeruddin, A.B.Tarasov, M.Graetzel. *New insight into the formation of hybrid perovskite nanowires via structure directing adducts*. *Chem. Mater.* 2017; 29: 587–594). Гибридные органо-неорганические перовскиты — новое поколение материалов для солнечной энергетики и предмет первых научных работ совместного российско-китайского университета МГУ—ППИ в Шеньжэне (КНР).

### Не планировали ли вы ввести на ФНМ курс истории наук о материалах для того, чтобы знакомить студентов с достижениями российских и зарубежных ученых в этой области?

На химическом факультете МГУ студенты слушают курс истории науки, разработанный сотрудниками кафедры общей химии и методики преподавания. Я иногда читаю лекции в рамках этого курса. Такие занятия, конечно, мотивируют студентов на дополнительное изучение некоторых вопросов: на ФНМ приходили студенты химфака, готовившие курсовые работы об исследованиях Третьякова. Но для того чтобы аналогичный курс появился на ФНМ, нужно написать историю материаловедения в России. А это крайне неблагоприятное дело, потому что все материалы в СССР — оборонные разработки, и информация о них закрыта. В неизвестности остается настоящий айсберг исследований — богатый, замечательный пласт истории нашей отечественной науки.

И все же наш факультет сделал кое-что для возвращения полузабытых имен отечественных материаловедов. Дело в том, что традиционно пионерами в науке о наноматериалах считаются зарубежные исследователи — в первую очередь американский физик Ричард Фейнман и японский материаловед Норио Танигути. В 2010 г. Третьяков записал несколько лекций по истории материаловедения,

выступал с популярными лекциями в Доме ученых, в которых показал: новое измерение, ось дефектов, важность вклада поверхности в свойства веществ и материалов предложил академик И.В.Тананаев, фактически введя категорию, которую сегодня мы именуем словом «нано». Фуллерены были открыты российскими учеными Д.А.Бочваром и Е.Г.Гальпериным «на кончике пера» в 1978 г. — за 20 лет до присвоения Нобелевской премии за них. Первая экспериментальная статья по углеродным нанотрубкам опубликована Л.В.Радужкевичем и В.М.Лукьяновичем в российском «Журнале физической химии» в 1952 г. — за 40 лет до публикации японцев в журнале «Nature». Известны и другие представители знаменитых отечественных научных школ, задолго до Фейнмана исследовавшие свойства наноматериалов, — например, академики В.А.Каргин и П.А.Ревбиндер, член-корреспондент В.Б.Алесковский. Лауреат Нобелевской премии академик Ж.И.Алферов — один из немногих наших ученых, действительно признанный в мире как внесший значительный вклад в развитие нанотехнологий. К сожалению, лекции Третьякова, прочитанные им в Доме ученых в Москве, не используются в существующем курсе по истории химии, заключенная в них информация не принимается во внимание и научными журналистами. Я полагаю, что об истории науки могли бы писать

именно научные журналисты, популяризаторы высокого уровня — это было бы очень полезно. Но того, кто возьмет на себя это право и обязанность, я пока не вижу.

**Портал «Нанометр» был создан выпускниками ФНМ для задач научной популяризации. Прошло более 10 лет. Удовлетворены ли Вы тем, как развивается научная популяризация в последние годы?**

Популяризация науки — очень важная работа. Но тем, как она сейчас ведется, лично я разочарован. Приведу пример. В образовательном центре «Сириус» организуется особая смена, в течение которой школьники могут своими руками делать интересные вещи, связанные с нанотехнологиями. К сожалению, мы наблюдаем тенденцию упрощения экспериментов: дети собирают машинки из готовых деталей, печатают некие объекты на 3D-принтере, а затем эти нехитрые занятия преподносятся в прессе как большие научные достижения. Так, изготовление на 3D-принтере рамки для размещения солнечной батареи журналисты трактовали как «создание солнечной батареи» и именно так о событии доложили президенту нашей страны. В погоне за горячими новостями растет профанация идеи популяризации научных знаний — ведь для того чтобы получилась солнечная батарея, нужны усилия химиков. На одной из нанотехнологических смен в «Сириусе» мы действительно сделали солнечную батарею вместе со школьниками, но об этом так называемые научные коммуникаторы, конечно, не написали подробно, хотя президент РФ ознакомился и с этой работой.

Вероятно, обычного человека больше не увлекает возможность узнать что-то новое, а всерьез затрагивает лишь то, что можно в руках подержать. Иными словами, воображением обывателя владеет форма, а не смысл. Возьмем пример с солнечными батареями: инженерная мысль, материализованная в виде изделия и отлитая на трехмерном принтере, видна всем и, следовательно, достойна освещения журналистами. А то, чего не видишь, не понимаешь и, возможно, боишься (химия, нанотехнологии) — не достойно внимания. Все это очень печально, потому что никакой инженер никогда не воплотит своих идей, пока химик не придумает для этого материал. Без химика, без материаловеда нет материального мира нашей цивилизации!

В область пиара с его красивыми и бесполезными «конфетными обертками» упорно скатывается нормальная научная популяризация — к счастью, пока еще не вся, но тенденция, как говорится, железная. Грустно наблюдать, как иной раз меропр-

ятия, задуманные как просветительские, превращаются в театр, в котором колбочки с цветными жидкостями ценятся наравне с действительно интересными объектами. Это не популяризация науки, а ее примитивизация.

Цель популяризации — показать величие науки (в нашем случае — химии, наук о материалах), благодаря которой создаются вещества для всех сфер человеческой деятельности. В фундаментальном материаловедении человек создает новое с нуля: он реализует идею синтеза не существовавшего прежде вещества. Химик-материаловед знает, как материал получить, для чего он нужен, и, как правило, доводит вместе с коллегами свое открытие до практического внедрения. Об этом очень мало говорят, и мало кто понимает, что без такой основы не будет ничего — ни инженерных изобретений, ни открытий в других фундаментальных научных областях. К сожалению, в управленческом аппарате, который определяет финансирование научных разработок, придают гораздо большее значение инженерно-технологическим инициативам — например, созданию роботов. Но добиться успеха, не развивая материаловедение, невозможно. Когда говорят, что орбитальный корабль-ракетоплан «Буран» — достижение инженерной мысли, забывают о том, как основу данной работы создавали тысячи химиков: пока отечественных материалов не было, воплотить инженерные расчеты не могли.

Общественное мнение формируется на примерах. Поэтому мы и наши выпускники придавали большое значение научной выставке, организованной в честь открытия Международного года Периодической таблицы химических элементов в Москве. И считали важным представить на этой площадке экспонаты, иллюстрирующие возможности материаловедения, нанотехнологий, в том числе изготовленные юными победителями наноолимпиады.

Портал «Нанометр» создан совсем не для массовой аудитории (на которую ориентированы научные коммуникаторы, придумавшие странный термин «забрендировать науку») — наша миссия искать одаренных молодых людей, готовых заниматься нужной и очень интересной работой. Помоему, это и есть главная задача научной популяризации. Да и не только ее задача. Учеными становятся не из-за эфемерной славы или денег (в нашей стране у так называемых эффективных менеджеров их гораздо больше, как правило). Наука — это семья, единомышленники, научная школа и «научные дети» — новые поколения исследователей, без которых все остановится и разрушится.

Интервью подготовила

**Е.В.Сидорова**

**Исследования, направленные на создание новых поколений солнечных батарей и обсуждаемые в данной публикации, поддержаны Российским научным фондом (проект 19-73-30022).**

# Исчерпание химических элементов в земной коре: обоснованна ли тревога?

Е.Г.Мирлин<sup>1</sup>, Л.В.Оганесян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный геологический музей имени В.И.Вернадского РАН (Москва, Россия)

<sup>2</sup>Российское геологическое общество (Москва, Россия)

На основе концептуального подхода В.И.Вернадского рассмотрена обоснованность тревоги относительно истощения элементов Периодической системы в земной коре. Дана количественная оценка неуклонно возрастающего вовлечения химических элементов в народно-хозяйственную деятельность, показан междисциплинарный характер проблемы на примере перспектив использования твердых полезных ископаемых в Мировом океане и содержащихся в них металлов. Мировоззренческий аспект проблемы находится в тесной связи с общим трендом развития цивилизации и с тенденциями в изменениях запросов человечества. Сделан вывод, что тревога обоснованна, хотя ресурсы недр можно считать неисчерпаемыми для достаточно продолжительного масштаба времени, сопоставимого с геологическим. Основа растущей тревоги заключается в непоправимом ущербе природной среде, который наносит человек, извлекая во все возрастающем количестве из земной коры химические элементы и вовлекая их в свою деятельность.

**Ключевые слова:** истощение, Периодическая система элементов, природная среда, цивилизация, Мировой океан, ресурсы недр.

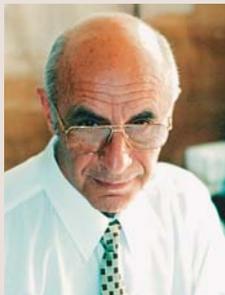
*...Человечество, взятое в целом, становится мощной геологической силой.*  
В.И.Вернадский

Человеческая цивилизация проделала грандиозный путь в неуклонном и растущем вовлечении в свою деятельность элементов периодической системы Д.И.Менделеева. Используя наглядный и зримый образ, его можно охарактеризовать как путь от молотка — кремневого, а затем железного — до космического аппарата, в деталях которого используются если не все, то подавляющее большинство встречающихся в природе химических элементов. Их доминирующая часть извлекается из земной коры в виде полезных ископаемых, причем во все возрастающем количестве. Деятельность человека в этом направлении становится «геологической силой». В справедливости слов В.И.Вернадского о «геологическом» могуществе людей нетрудно убедиться, взглянув на рукотворные формы рельефа. Приведем два примера. В одном случае это воронка глубиной 525 м и диаметром 1200 м, которая пред-

ставляет собой карьер по добыче алмазов в кимберлитовой трубке «Мир» в Якутии (рис.1). Отметим, что по размерам данная искусственная воронка существенно превышает параметры крупнейших



**Евгений Гилельевич Мирлин**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Государственного геологического музея имени В.И.Вернадского РАН. Круг научных интересов охватывает вопросы геодинамики, морской геологии, геофизики. Постоянный автор «Природы». e-mail: egmmir@gmail.com



**Левон Ваганович Оганесян**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, вице-президент Российского геологического общества. Область научных интересов — металлогения, минерально-сырьевая база России и мира. e-mail: oganessian@alliance-gr.com



Рис.1. Аэрофотоснимок алмазоносного карьера кимберлитовой трубки «Мир» (Якутия). Диаметр воронки 1200 м, глубина 525 м.

в мире естественных карстовых воронок. В другом случае это, напротив, отвал горной породы одной из угольных шахт Воркуты, представляющий собой гору высотой в несколько десятков метров (рис.2). По объему сосредоточенной в ней породной массы она вполне сопоставима с природными возвышенностями, например моренами (ледниковыми отложениями, образованными неоднородным обломочным материалом). Полезные ископае-

мые, добыча которых сопровождается возникновением столь масштабных рукотворных форм рельефа, относятся к невозобновляемым природным ресурсам. Формирование их длилось многие миллионы лет, но восстановить такие ресурсы при их использовании и исчерпании невозможно. Материальные запросы человечества постоянно возрастают, увеличивается численность населения земного шара, все более негативным становится воз-

действие людей на природную среду. В совокупности эти факторы обуславливают рост тревоги о конечности природных ресурсов, сосредоточенных в земной коре. Особенно она усилилась в последние десятилетия, причем сейчас можно говорить и о беспокоействе, связанном с возможным исчерпанием как ресурсов земной коры в целом, так и отдельных элементов.

Насколько обоснованна такая тревога? Мы попытались дать ответ на этот вопрос, опираясь на концептуальные подходы Вернадского. В своей работе «Биосфера» он с горечью констатирует: «Меня давно уже удивляет отсутствие стремления охватить



Рис.2. Отвалы горной породы одной из угольных шахт Воркуты. Высота их может достигать более 50 м.

Фото А.Ермачкова

Природу как единое целое в областях эмпирического знания, где мы, однако, можем это сделать. Мы нередко даем простое собрание фактов и наблюдений там, где мы можем дать целое» [1, с.175]. Упрек великого естествоиспытателя мы восприняли как относящийся именно к нам и как руководство к действию. Исходя из этого, мы постарались рассмотреть исчерпание элементов периодической системы в земной коре как единую целую проблему, включающую в себя различные аспекты. Первый — количественный. Тенденция использования элементов периодической системы в народно-хозяйственной деятельности во все большем масштабе очевидна. Важно дать количественные оценки такой тенденции. Второй — междисциплинарный. Современная наука достигла поистине виртуозности в том, что касается расчленения единого природного объекта на части, на мельчайшие компоненты. Одновременно неуклонно растет число проблем, где именно междисциплинарные исследования совершенно необходимы для углубленного понимания их природы и значения. Рассматриваемая проблема относится именно к этой категории. Наконец, третий — мировоззренческий. Конечность элементов и природных ресурсов в целом тесно увязана с общим трендом развития цивилизации и изменениями запросов человечества.

**Количественный аспект.** Основа современной промышленности — черные и цветные металлы, а также углеводородное сырье. Информация о минерально-сырьевой базе этих природных ресурсов содержится в обзорах и статистических справочниках [2, 3]. Имеющиеся в них данные положены в основу наших оценок. Рассмотрим вначале динамику роста объемов добычи черных и цветных металлов, извлекаемых из месторождений соответствующих руд [4]. Наиболее достоверные сведения имеются для 1987 и 2014 гг., что позволяет охарактеризовать рост добычи за более чем четверть века, т.е. за достаточно продолжительный промежуток времени. В табл.1 помимо величин добычи указана также кратность ее увеличения по сравнению с 1987 г. Нетрудно видеть, что для всех металлов (и черных, и цветных) объем добычи за рассматриваемый период резко возрастает. Для большинства металлов кратность превышает 2.5 раза, а максимальная ее величина (для никеля) составляет 4.46. Если сопоставить рост добычи полезных ископаемых с данными о росте народонаселения Земли за рассматриваемый период, то выясняется, что до конца третьей четверти XX в. темпы роста объемов

добычи полезных ископаемых соответствовали темпам роста народонаселения или немного их превышали. Принципиальные изменения произошли за последние более чем четверть века. Среднегодовые темпы роста добычи минерального сырья значительно превзошли темпы роста населения. По черным и цветным металлам увеличение составило 4 раза, по редким и редкоземельным элементам — почти 8, по топливно-энергетическим ресурсам — 2. Тем самым количественные оценки подтверждают нарастающие со временем масштабы использования человечеством ресурсов земной коры.

Другой важный фактор — крайняя неравномерность обеспеченности народонаселения Земли основными металлами и углеводородами. Это иллюстрируется данными, содержащимися в табл.2. При проведении оценок учитывались минерально-сырьевые ресурсы тех стран, которые обладают ресурсами, составляющими более 1% от мировых. Выяснилось, что всего 14 стран с населением 33% располагают 85% общемировых запасов нефти. Не менее контрастная картина наблюдается по черным, цветным и другим металлам. Так, 80% запасов столь значимого для атомной промышленности урана сосредоточено всего в семи странах. При этом в них проживает только 5% населения Земли. Эту неравномерность можно количественно охарактеризовать. Введем показатель обеспеченности одного жителя нашей планеты полезными ископаемыми, приняв ее за единицу. Как видно из табл.2, показатели обеспеченности одного жителя 14 стран с наибольшими запасами минерального сырья отличаются более чем на порядок по сравнению с жителями других стран. Существенно, что различие касается таких стратегических видов сырья, как нефть и газ. Несомненно, столь контрастная неравномерность распределения природных минерально-сырьевых ресурсов вносит дополнительный вклад в напряженность и тревогу относительности их исчерпания.

Таблица 1

Мировые объемы добычи черных и цветных металлов в 1987 г. и 2014 г. [2, 3, с дополнениями]

Металлы	Добыча		Кратность*
	1987 г.	2014 г.	
Железо, млн т	502.02	1 966.14	3.92
Марганец, тыс. т	12 544.7	48 920	3.90
Хром, тыс. т	9 930	29 609	2.68
Итого: черные металлы, млн т	524.49	2 044.67	3.89
Медь, тыс. т	6 387.1	18 228	2.85
Никель, тыс. т	549	2 448.5	4.46
Свинец, тыс. т	2 275.2	5 634.5	2.48
Цинк, тыс. т	5 030.6	13 693	2.72
Итого: цветные металлы, тыс. т	14 241.9	40 004	2.81

\* Отношение показателей 2014 г. к показателям 1987 г.

Таблица 2

Распределение запасов минерального сырья и народонаселения на Земле\*

Полезное ископаемое	Количество стран	% от мировых запасов	% от мирового населения	Показатель обеспеченности одного жителя	
				по учтенным странам	по другим странам
Нефть	14	85	33	2.6	0.22
Газ	6	67	9	7.4	0.25
Уголь	7	78	46	1.7	0.41
Уран	7	80	5	16	0.21
Железо	7	69	33	2.1	0.46
Марганец	8	88	7.5	11.7	0.15
Медь	7	63	29	2.2	0.52
Никель	5	84	4	21	0.17
Свинец	8	69	29	2.4	0.44
Цинк	10	87	42	2.1	0.22
Вольфрам	5	83	25	3.3	0.23
Молибден	6	75	25	3	0.33
Фосфатное сырье	8	81	9	9	0.23

\* Показатель обеспеченности сырьем по миру в целом принят за единицу. В таблице учтены страны, имеющие запасы, составляющие более 1% от мировых запасов.

**Междисциплинарный аспект.** Ранее неоднократно отмечалось\*, что запасы месторождений полезных ископаемых, выходящих на земную поверхность, близятся к истощению [5, 6]. Соответственно, исключительно актуальной становится проблема поиска месторождений, тяготеющих к глубинным горизонтам земной коры. Для геологической науки это серьезный вызов. Необходимо разработать критерии прогноза и поиска различных видов минерального сырья, залегающего на значительных глубинах, а это можно сделать лишь объединенными усилиями не только геологов разных направлений (рудников, тектонистов, геохимиков, геофизиков и др.), но и специалистов в области физики различных природных сред [6]. Решение данной проблемы — дело весьма отдаленного будущего. По этой причине взоры человечества, остро нуждающегося в минеральном сырье, все чаще обращаются к Мировому океану, где были открыты масштабные скопления металлических полезных ископаемых. Они представлены железомарганцевыми конкрециями (ЖМК), кобальто-марганцевыми корками и глубоководными полиметаллическими сульфидами. Большинство скоплений океанских руд располагаются в пределах международных вод Мирового океана, и они объявлены общечеловеческим достоянием. Россия — первая страна, которая в 2001 г. получила от Международного органа по морскому дну (МОМД) контракт на проведение в течение 15 лет геолого-разведочных работ на ЖМК в разведочном районе в пределах обширной рудной провинции Кларион-Клиппертон (центральная часть Тихого океана). Кроме того, наша

страна имеет контрактное право на проведение работ по рудным скоплениям кобальто-марганцевых корок и глубоководных сульфидных руд [7].

Уже выполненные детальные исследования в пределах разведочных районов позволили установить, что ресурсный потенциал всех трех видов скоплений значителен и сопоставим с потенциалом суши, более того, по кобальту более чем на порядок его превышает (табл.3). Стало очевидным, что по мере отработки запасов и ресурсов на континентах настанет эпоха освоения руд Мирового океана, причем тенденция эта будет иметь общепланетарный характер. Однако не менее очевидно, что ее реализация на практике потребует решения совершенно новых задач с привлечением специалистов по различным научным дисциплинам и их тесного взаимодействия. Междисциплинарный подход к решению данной проблемы обусловлен рядом факторов. Прежде всего, аналогов железомарганцевых конкреций и кобальто-марганцевых корок на континентах не существует, а отсутствие в них традиционных минералов, содержащих полезные компоненты (Ni, Cu, Co), исключает выде-

Таблица 3

Сравнительный минерально-сырьевой потенциал суши и Мирового океана

Металлы	Суша*	Мировой океан
Марганец, млн т	20 094	13 649
Никель, тыс. т	271 608	47 100
Медь, тыс. т	2 231 346	301 034
Кобальт, тыс. т	19 252	225 000

\* Приведены суммарные величины прогнозных ресурсов и запасов соответствующих металлов.

\* См.: Мирлин Е.Г. Тектоника плит — что дальше? // Природа. 2017. №8. С.15–23.

ление концентратов соответствующих металлов с помощью известных технологий обогащения руд и требует разработки новых.

Далее, рудные объекты дна океана принципиально отличаются от континентальных по ряду важных характеристик. Для них отсутствует вмещающая среда, рудные образования «обнажены». Скопления ЖМК находятся в россыпном состоянии и залегают на нелитифицированном основании, а контакт кобальто-марганцевых корок с подстилающим коренным основанием весьма неоднороден. Все перечисленные особенности океанских руд крайне затрудняют разработку технико-технологических комплексов для их подъема со дна океана. Существующие технические средства позволяют проводить отбор лишь малообъемных проб и рудной массы. Применительно к добыче ЖМК предлагаются лишь самые общие схемы действия комплексов, причем уже сейчас очевидна сложность их конструкции. Комплекс должен включать в себя механизм, собирающий конкреции (сгребающий, черпаковый, гидравлический, шнековый, роторный, вибрационный или комбинированный); соответствующие приводы; устройства для управления, наблюдения и контроля; кабельные линии и коммутационные сети; систему аварийного всплытия и другие элементы. Рассматриваются различные технические решения. Промышленная конструкция должна быть адаптирована для добычи всех трех типов океанских руд, с учетом их агрегатного состояния, геологических условий локализации, рельефа дна океана и других факторов. Стационарно действующий комплекс должен обеспечивать подъем с больших глубин (более 3–4 тыс. м) значительных масс руды, освобождение их от естественной влажности, транспортировку на большие расстояния. Несомненно, при создании таких проектов первостепенную роль будут играть вопросы экологии и сохранения уникальных биоценозов пелагиали. Становится понятным то, что пока ни одна страна или бизнес-структура не объявила о своей готовности к созданию такого комплекса.

Хотя колчеданные континентальные руды считаются аналогом океанских полиметаллических сульфидов [8], сведения об их внутренней минералогической, геохимической и структурной зональности недостаточны, и это затрудняет разработку научной основы, на базе которой должна создаваться методика разведки, оценки и подсчета запасов. Безусловно, благоприятным фактором при добыче океанских полезных ископаемых будет то, что все они выходят на поверхность дна и вскрышных работ не потребуются. Не нужно проходить горные выработки и осуществлять буровзрывные работы. Высокие содержания основных и попутных компонентов, значительный объем рудной массы свидетельствуют в пользу освоения океанских руд.

Тем не менее, их высокая природная ценность, определенная по аналогии с традиционными месторождениями континентов, не может служить надежным экономическим критерием их конкурентоспособности с континентальными залежами. Чтобы ее доказать, необходимо получить сведения о соотношении между издержками работ по их добыче, транспортировке, переработке и ценностью самих руд. Однако эти сведения невозможно получить без знания способов, техники и технологии добычи и их переработки. Сейчас вполне очевидно, что освоение минерально-сырьевого потенциала океанской земной коры — комплексная, междисциплинарная проблема, включающая в себя необходимость совместного решения геологических, экологических, технико-технологических и социальных задач.

**Мировоззренческий аспект.** Осознав могущество людей как геологической силы, Вернадский уже в начале XX в. предупреждает: «...перед человеком открывается огромное будущее, если он поймет это и не будет злоупотреблять свой разум на самоистребление» [1, с.174]. Другими словами, растущие материальные запросы человека как геологической силы и наука, обеспечивающая эти запросы, ставят перед человечеством серьезную морально-этическую проблему. При этом во второй половине 20-го столетия обозначилась еще одна тенденция, которая была не столь явно выражена в его начале, и которая, по сути, усугубляет указанный морально-этический императив. Дело в том, что наблюдается некий парадокс: невзирая на прогрессирующее использование и потребление минерального сырья, его балансовые запасы\* в разных странах мира (включая топливно-энергетическое сырье) постоянно возрастают. В этом нетрудно убедиться, рассмотрев данные табл.4. Обращает на себя внимание то, что кратность роста запасов и снижения содержания полезных компонентов в рудах сопоставимы по абсолютным величинам. Природа этого парадокса обусловлена рядом причин. К ним относятся: во-первых, увеличение детальности геологического изучения земной коры; во-вторых, рост глубин, доступных для добычи сырья. Этому способствует исчерпание фонда месторождений, располагающихся на современном эрозионном срезе. Наконец, в-третьих, постепенное и непрерывное смещение понятия «руда — пустая горная порода» в сторону «пустой породы». Поясним: под рудой обычно понимают природное минеральное образование, содержа-

\* Балансовые запасы — группа запасов полезных ископаемых, использование которых экономически целесообразно при существующей (либо осваиваемой промышленностью) технике и технологии добычи и переработки сырья с соблюдением требований законодательных актов по рациональному использованию недр и охране окружающей среды.

Таблица 4

Динамика запасов полезных ископаемых и минимальных пределов содержаний металлов в рудах в 1987 г. и 2014 г. [2, 3 с дополнениями]

Металлы	Начало 1987 г.		Начало 2014 г.		Кратность: роста (+), снижения (-)	
	запасы	минимальное содержание металла в руде, %	запасы	минимальное содержание металла в руде, %	запасов	содержания металлов
Железо, млн т	109 008	40	265 669	30	+2.44	-1.33
Марганец, млн т	4 201.5	32	5 506	22	+1.31	-1.45
Хром, млн т	3 412.4	25*	4 002.2	20*	+1.17	-1.25
Итого: черные металлы, млн т	116 621.9	—	275 177.2	—	+2.36	—
Медь, тыс. т	477 040	0.7	856 666	0.4	+1.8	-1.75
Никель, тыс. т	45 745	0.7	84 698	0.3	+1.85	-2.33
Свинец, тыс. т	86 460	1.1	136 329	0.6	+1.58	-1.83
Цинк, тыс. т	17 110	4	321 473	2.0	+1.88	-2.0
Итого: цветные металлы, тыс. т	780 355	—	1 399 166	—	+1.79	—

\* Содержание  $Cr_2O_3$ .

шее полезные компоненты (чаще всего металлы) в концентрации, которая делает извлечение этих компонентов экономически целесообразным. Наблюдается очевидная тенденция перехода от добычи сплошных руд к добыче прожилковых, прожилково-вкрапленных и вкрапленных. Другими словами, резко снизились требования к качеству руды, т.е. к минимально допустимым низким содержаниям металлов в ней. С учетом данного фактора можно уверенно утверждать, что по критериям, принятым в геологии и горном деле XIX и даже начала XX в., полезные ископаемые на нашей планете уже исчерпаны. Однако новые технологии добычи полезных ископаемых и переработки рудной массы обуславливают рост запасов и минеральных ресурсов. Именно благодаря этому появляются так называемые нетрадиционные источники сырья. К ним, в частности, принадлежат углеводороды, называемые сланцевыми, о которых так много говорится в последние годы. Геологам-нефтяникам хорошо известно, что все осадочные породы содержат углеводороды в жидком или газообразном состоянии либо в виде битумов. Это, по сути, некий аналог кларков химических элементов. Вопрос лишь в наличии технологии их эффективного извлечения и экономической целесообразности всего процесса. И не случайно, что шумиха вокруг сланцев возникла в период максимума цен на углеводородное сырье.

Если продолжить тренд «руда — пустая порода» в сторону «пустой породы», то в своем пределе полезным ископаемым могут стать обычные горные породы, ведь в них общая масса полезных компонентов многократно превышает массу всех химических элементов, сконцентрированных в рудах. Разумеется, находятся они в исключительно рассеянном состоянии. Для демонстрации интегрального сырьевого потенциала земной коры приведем следующий пример. Среднее содержание золота в коре составляет 0.003 г/т. Если пересчитать его

суммарное количество до глубин, доступных для добычных технологий (около 3 км), то получим астрономическую величину в миллиарды тонн — при том, что за всю историю человечества добыто не более 200 тыс. т золота. Нетрудно оценить, что аналогичная картина может быть получена и по другим элементам периодической системы. Другими словами, ресурсы недр можно считать неисчерпаемыми — разумеется, для достаточно продолжительного масштаба времени, сопоставимого с геологическим. Казалось бы, о чем беспокоиться?

Однако при оценке общей картины вступает в силу фактор «человека как геологической силы». Причина в том, что извлечение полезных компонентов из обычных горных пород в возрастающих объемах неизбежно приведет к необратимым и отрицательным трансформациям в геологической среде. Во все больших масштабах будут образовываться, как это уже происходит (см. рис.1, 2), новые формы рельефа. Гигантские провалы на поверхности земли могут послужить триггером для механизма техногенных катастроф. Но необратимые последствия затронут не только геологическую среду. Они, в силу постоянного обмена веществом и энергией, несомненно, охватят все оболочки Земли — гидросферу, биосферу и атмосферу\*. Пример тому — экологические последствия так называемой сланцевой революции. При одном гидроразрыве пласта, который необходимо осуществить для извлечения из него углеводородов, объем закачанной в недра воды достигает 5–10 тыс. т, объем рыхлого наполнителя — 500–1000 т, а химикатов (бензола, соляной кислоты и др.) — 200 т. Разумеется, это сопровождается отравлением подземных вод, что в последующем неминуемо окажет отрицательное влияние на биоценозы. При этом из-за короткого

\* См.: Мирлин Е.Г., Миронов Ю.В. Взаимодействие геосфер — основа жизни нашей планеты // Природа. 2013. №3. С.43–49.

жизненного цикла сланцевых скважин их бурят не десятками, а сотнями и тысячами. Кроме того, переход к отработке рядовой горной породы неизбежно приведет к резкому увеличению энергозатрат, а также к необходимости включения дополнительных компонентов в технологический процесс извлечения из породы химических элементов.

\* \* \*

Итак, на вопрос, обоснованна ли тревога об исчерпании элементов периодической системы в земной коре, мы можем твердо ответить: «Да, она обоснованна». Но неверно связывать эту тревогу с тем, что в будущем наступит дефицит какого-либо элемента или группы элементов. Их количества в земной коре вполне достаточно для удовлетворения запросов человека, а все более совершенная

технология их извлечения обеспечивает растущие потребности в обозримый период времени. Но, как показывает уже имеющийся опыт, извлекая элементы из геологической среды, человек наносит ей и природе в целом неизлечимые раны. Человечество доселе не осознало последствия своего воздействия на природу, не осознало себя как «геологическую силу» и, отдавая себе отчет в своем «могуществе», продолжает наращивать уровень своего потребления. Возникают естественные вопросы: имеются ли границы у этого потребления и, если имеются, как их определить? И вообще: способен ли человек ограничить свои потребности?

Разумеется, ответы на эти вопросы выходят за рамки данной статьи. Тем не менее, сама их постановка в Международный год Периодической таблицы элементов представляется весьма актуальной. ■

## Литература / Reference

1. Вернадский В.И. Биосфера. М., 2001. [Vernadsky V.I. Biosphere. Moscow, 2001. (In Russ.).]
2. Минеральные ресурсы мира. Статистический справочник на 2015 г. М., 2016. [Mineral resources of the world. Statistical handbook. Moscow, 2016. (In Russ.).]
3. Минеральные ресурсы развитых и развивающихся капиталистических стран (на начало 2014 г.). М., 1988. [Mineral resources of the developed and developing capitalist countries (on the beginning of 2014 year). Moscow, 1988. (In Russ.).]
4. Оганесян Л.В. Экологические и технико-технологические проблемы освоения нетрадиционных источников минерального сырья. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2019; (2): 48–52. [Oganesian L.V. Environmental and technical and technological problems of development of non-traditional sources of mineral raw materials. Mineral resources of The Russia: The Economics and management. 2019; (2): 48–52. (In Russ.).]
5. Оганесян Л.В. Проблемы сланцевых углеводородов: за и против. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2016; (3): 24–29. [Oganesian L.V. Problems of shale hydrocarbons: pros and cons. Mineral resources of The Russia: The Economics and management. 2016; (3): 24–29. (In Russ.).]
6. Мирлин Е.Г., Оганесян Л.В. Вихри в литосфере. М., 2015. [Mirlin E.G., Oganesian L.V. Vortices in the lithosphere. Moscow, 2015. (In Russ.).]
7. Оганесян Л.В., Андреев С.И., Мирлин Е.Г. Системные проблемы изучения и освоения минерально-сырьевого потенциала российских разведочных районов в Мировом океане. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2018; (4): 44–52. [Oganesian L.V., Andreev S.I., Mirlin E.G. The system problems of studying and development of mineral resources potential of The Russian exploration areas in the World Ocean. Mineral resources of The Russia: The Economics and management. 2018; (4): 44–52. (In Russ.).]
8. Металлогения современных и древних океанов. Ред. Е.Г.Мирлин. М., 1992. [Metallogenic of the modern and ancient oceans. E.G.Mirlin (ed.). Moscow, 1992. (In Russ.).]

## Exhaustion of Chemical Elements in the Earth's Crust: Is Anxiety Reasonable?

E.G.Mirlin<sup>1</sup>, L.V.Oganesian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vernadsky State Geological Museum, RAS (Moscow, Russia)

<sup>2</sup>Russian Geological Society (Moscow, Russia)

The reasonability of anxiety regarding the exhaustion of elements of the periodic system in the Earth's crust is considered based on the conceptual approach of V.I.Vernadsky. A quantitative assessment of the increasing involvement of chemical elements in national economic activity is given; the interdisciplinary nature of the problem is shown on example of the prospects for the use of solid minerals of the World Ocean and their metals. The worldview aspect of the problem is closely related to the general trend of the civilization development and to trends in demand changes of humanity. The reasonability of anxiety has been concluded, although the reason for this anxiety lies not in the limited amount of elements. The depths resources can be considered inexhaustible for a sufficiently long time comparable with the geological scale. The basis of growing anxiety lies in the irreparable damage to the natural environment that humanity causes by increasing extraction of chemical elements and involving them into its activities.

**Keywords:** exhaustion, periodic system of elements, natural environment, civilization, World Ocean, resources of the subsoil.

# Узнай меня, если сможешь: ВОЗМОЖНОСТИ идентификации моржей

Н.В.Крюкова

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (Москва, Россия)





Береговые залежки моржей в ветренную погоду на мысе Ванкарем (Чукотка).

Здесь и далее фото автора

В статье детально проанализированы возможности фотоидентификации моржа как в природе, так и в неволе с учетом особенностей, обусловленных их содержанием. Показано, что этот метод распознавания особей имеет значительные преимущества при долговременных наблюдениях за фокальными животными, но применять его целесообразно только при наблюдениях за небольшими группами зверей.

**Ключевые слова:** фотоидентификация морских млекопитающих, морж (*Odobenus rosmarus*), долговременные наблюдения.



**Наталья Владимировна Крюкова**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела морских млекопитающих Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. Более 20 лет изучает морских млекопитающих. Область научных интересов — всесторонние исследования моржа.  
e-mail: nkryukova@gmail.com

**М**ожем ли мы узнавать животных, виденных нами прежде, по их внешним чертам? Этот вопрос всегда интересовал исследователей, занимающихся долговременными наблюдениями за фокальными\* животными [1, 2]. Мы без труда узнаем человека, ориентируясь на черты лица, манеру движения и голос. И даже при кратковременной встрече с незнакомцем можем по памяти восстановить и описать его образ. Правда, с представителями других рас дело обстоит немного иначе: узнавание превращается в сложную задачу, для ее решения нужно хорошо запомнить непривычный «репертуар» черт людей — только тогда начинаешь замечать индивидуальные особенности. Но для этого требуется время... С животными ситуация еще сложнее. Для человека, который никогда не работал с братьями нашими меньшими, существа одного вида очень похожи — так сказать, на одно лицо. Однако, понаблюдав за ними, начинаешь замечать специфические черты. Пытаясь отличить одну особь от другой, мы ориентируемся в первую очередь на яркие признаки — маркеры. Например, отмечаем форму и соотношение элементов рисунка на шерсти или коже [2, 3]. У животных, обладающих однотон-

\* Наблюдения за фокальными животными — продолжительные наблюдения за одним или несколькими животными одного вида, принадлежащими к большой группе.

ной окраской, обычно регистрируем наличие кожных поражений (шрамов, царапин, язв) или изъянов (отсутствие части органа — например, пальца, части плавника) [1, 4]. Метод фотоидентификации позволяет запечатлеть даже небольшие маркеры [5] и широко используется, особенно для распознавания морских млекопитающих.

Если мы ведем наблюдения за представителями долгоживущих видов животных, самым важным свойством признака-маркера становится его стабильность. Какие же черты сохраняются на протяжении большого отрезка времени? Таков рисунок на шерсти или коже — по этому признаку можно уверенно идентифицировать животных даже через 25 лет [2]. А вот кожные дефекты (неглубокие шрамы, язвы), помогающие исследователю различать обладателей однотонной окраски, могут со временем стать неприметными, а то и вовсе исчезнуть через каких-нибудь пять лет [6]. Дабы избежать подобных ситуаций, необходимы регулярные наблюдения для обновления каталога — т.е. регистрации динамики изменения (исчезновения) старых шрамов и появления новых. При исследовании разных видов тюленей широко используется идентификация особей с помощью периодической фотосъемки [4, 5, 7–9], а в 1982–1991 гг. были предприняты первые попытки фотоидентификации атлантических моржей [10].

Мы изучаем моржей много лет и вопрос их идентификации по внешним признакам нас чрезвычайно интересовал. Рассматривая фотографии моржей зоопарка Хагенбека (Tierpark Hagenbeck) в Гамбурге (Германия), автор настоящей статьи узнала тех животных, с которыми работала 16 лет назад, и этот эпизод заставил всерьез задуматься о том, какие особенности становятся ориентиром при узнавании представителей данного вида. Мы поставили перед собой цель оценить возможности идентификации моржей в природе и в условиях неволи, а также проанализировать признаки, которые можно для этого использовать.

Представляю вниманию читателя результаты проведенного анализа.

Мы изучили фотографий моржей, отловленных в возрасте 4–6 мес на Чукотке осенью 1996 г. (девять особей) и 1997 г. (четыре особи) и содержащихся в Московском зоопарке до марта 2013 г. Впоследствии оставшиеся три особи (все 1996 г. рождения) были перевезены в зоопарк Хагенбека и находятся там в настоящее время. Исследованные фотографии сделаны автором и коллегами во время работы с животными в разные годы (1998–2002), кроме того, мы использовали снимки из Интернета. Длительность наблюдений за изменениями во внешности моржей варьировалась, и это связано с продолжительностью их жизни. Период исследования самца Одиннадцатый (Odin), самок Полоса

(Polosa) и Дина (Диана, Dyna) оказался максимальным: в 2019 г. им исполнилось по 23 года.

Дополнительно мы использовали для анализа фотографии моржей в природе, снимки 2010–2019 гг. трех моржей из Ижевского зоопарка (самца Энурмина и самки Евы 2006 г. рождения, а также самки Несейки 2007 г. рождения) и фото моржей из других океанариумов, любезно предоставленные их сотрудниками.

### Заметный возраст

В настоящее время для определения пола и возраста моржей в природе используется методика, разработанная американскими специалистами для тихоокеанского моржа [11] (рис.1). Она основана на морфометрических особенностях экстерьера животных. Возрастные группы выделены непосредственно на основе соотношения длины бивней (верхних клыков) к высоте и ширине губной подушки, на которой расположены вибриссы (рис.2–4). Но, оказавшись в неволе, моржи в силу своих инстинктов сильно, часто до десны, стачивают бивни о бетонное покрытие. В результате обнажается по-

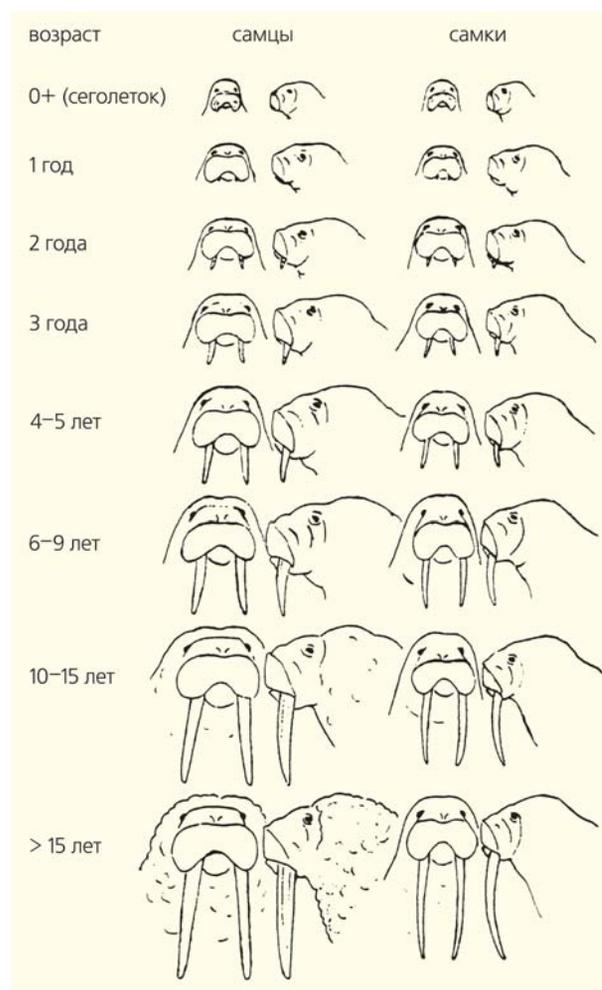


Рис.1. Половые и возрастные группы тихоокеанского моржа.

лость пульпы зуба, туда проникает инфекция, и регулярно возникает воспаление (пульпит). Поэтому в настоящее время бивни у молодых моржей обычно удаляют [12, 13], а в некоторых океанариумах на них ставят титановые коронки, которые не дают стачиваться зубам [14]. Соответственно, методику определения возраста моржа по бивням в условиях неволи применить невозможно. Тем не менее удается различить группы сеголетков и годовиков\*. Мы описали животных этих возрастных групп, залегающих на лежбище в августе—октябре, опираясь на данные собственных наблюдений [15].

Сеголеткам к осени 4–6 мес, они не имеют внешне заметных верхних клыков, которые в это время только начинают прорезаться, но у большинства детенышей уже есть другие зубы — нижние клыки и нижние премоляры [16]. Кожный и волосяной покровы малышей темного, иногда черного цвета. Движения сеголетка неуверенные и неточные, он еще очень мал — не более трети размера матери. Морда ко-

\* Сеголеток — животное, родившееся в этом году (возраст менее года); годовик — молодое животное на втором году жизни.

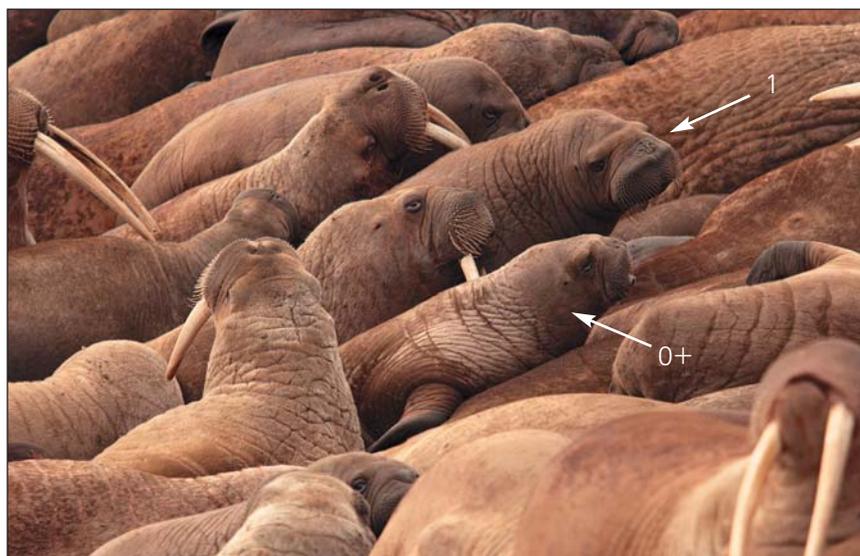


Рис.2. Детеныши тихоокеанского моржа на береговом лежбище на мысе Ванкарем (Чукотка): сеголеток (возраст до года) и годовик (возраст от года до двух лет).

роткая и немного сморщенная, с боковыми складками между глазами и губной подушкой (рис.2).

Возраст годовиков осенью примерно от 1 года 4 месяцев до полутора лет, они немного крупнее сеголетков и вдвое меньше взрослой самки (см. рис.2). Кожный и волосяной покровы молодых моржей окрашены в черный или буроватый цвета. Кончики верхних клыков не всегда видны, обычно их можно разглядеть, только когда детеныш открывает рот. Морда годовика чуть вытяну-

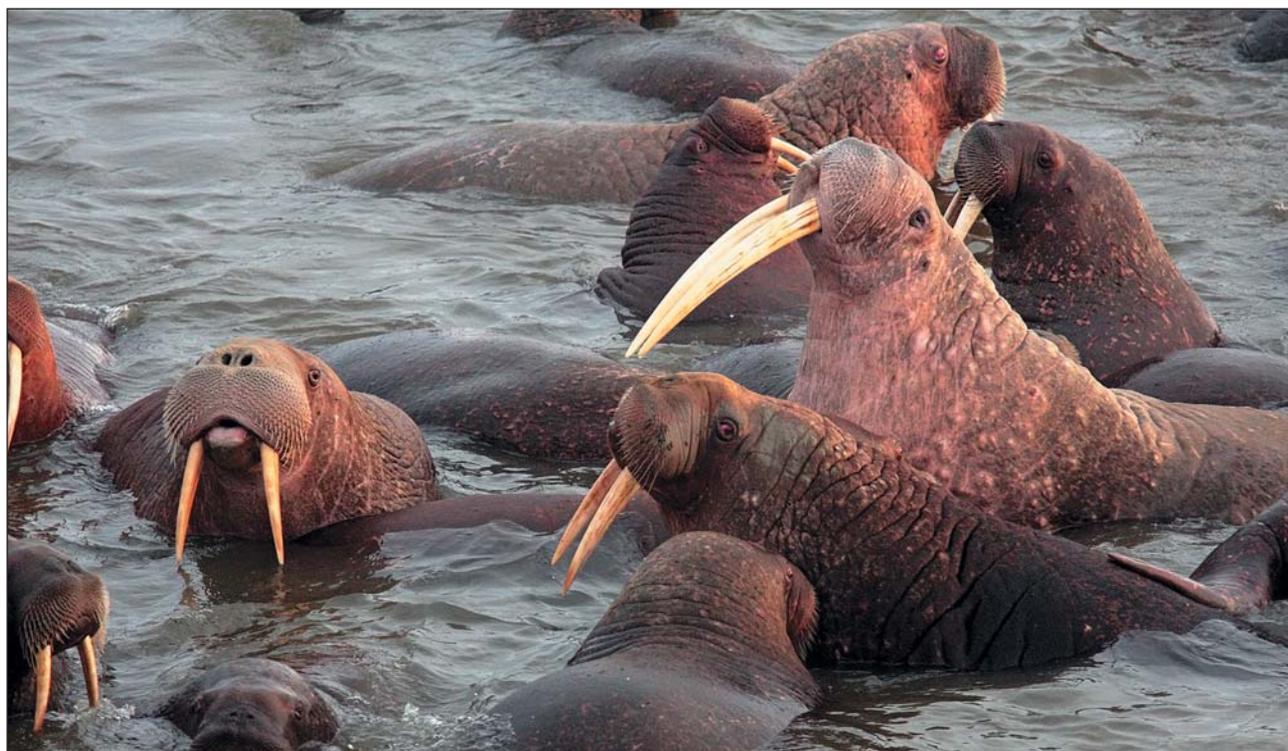


Рис.3. Моржи разного возраста на мелководье у лежбища.



Рис.4. Взрослый самец моржа (в возрасте старше 15 лет).

та, не сморщена, движения более точны и осмысленны, чем у сеголетка.

Без бивней можно идентифицировать и матерых самцов (в возрасте 10 лет и старше) — по формирующейся на шее «гриве» с шишками, количество которых увеличивается с возрастом. Эти образования со временем появляются на груди и частично на спине животного (рис.4).

### Проявление индивидуальности в облике

В первые месяцы жизни на мордочках моржат формируются складки кожи (морщины) в результате подвижности лицевых мышц и губной подуш-

ки с вибриссами, что связано с лактацией, вокализацией, осязанием (посредством движения вибрисс) и дыханием. Эти складки расположены в области носа, ушного отверстия, глаз и вокруг губной подушки (рис.5). Мы взяли портреты нескольких моржей, живущих в природе, и рассмотрели варианты морщинок на морде (рис.6).

Нетрудно заметить, что у всех моржей имеются кожные складки, но их форма и расположение различаются. Мы описали множество вариаций кожных складок в боковой части морды животных: сочетаются разное число и длина складок, прямых и «ветвистых», прерывистых и сплошных, соединяющихся или нет между собой, располо-

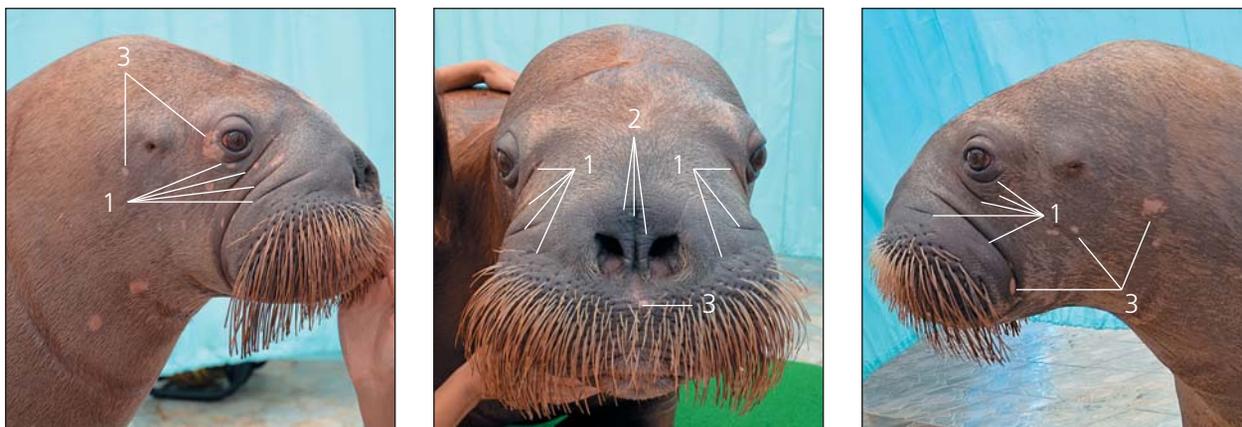


Рис.5. Портрет двухлетнего моржа в разных ракурсах и маркеры, на основе которых проводится идентификация особи: 1 — складки кожи сбоку морды, 2 — складки кожи вокруг носового отверстия, 3 — депигментированные пятна.

Фото А.Крюковой

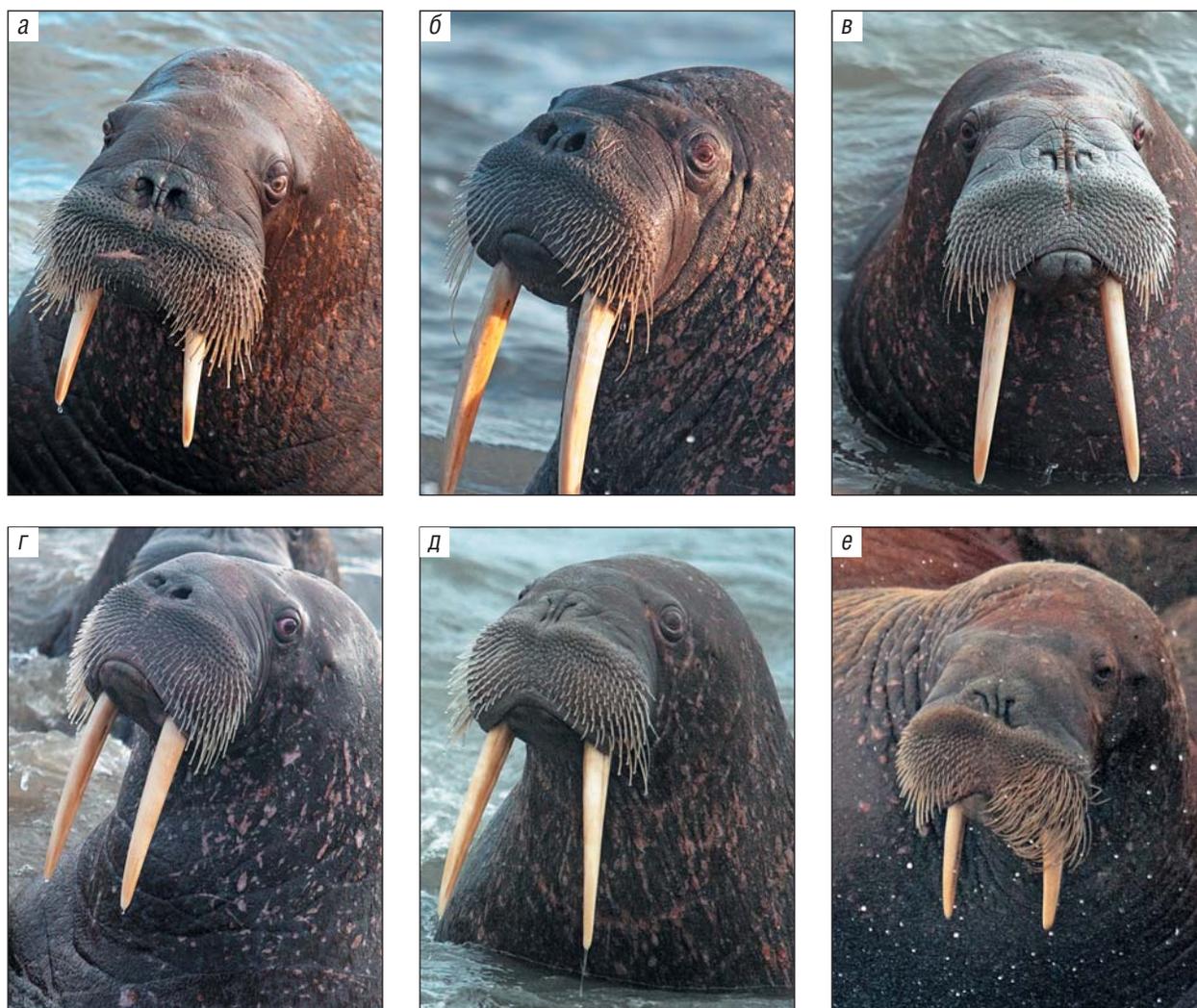


Рис.6. Портреты разных моржей (а–е) в возрасте 4–5 и 6–9 лет в природе (Чукотка); на (е) у моржа заметна травма на левой стороне морды: расслаблены мышцы и сохранились длинные вибриссы слева.

женных на разном расстоянии друг от друга, достигающих носового отверстия и не доходящих до него. Одна или несколько складок проходят над носовым отверстием или под ним. Индивидуальные особенности в формировании морщин, вероятно, связаны со свойственной животному манерой движения губной подушки.

У моржей есть морщины и на шее, и по всему телу — например, в области конечностей. Кроме того, на их коже, в том числе на туловище и лапах, есть небольшие депигментированные пятна разной формы и размеров, а также шрамы, образовавшиеся вследствие перенесенных заболеваний и на месте ран. Все эти отметины становятся дополнительными маркерами при идентификации их обладателей.

В природе большинство моржей сильно стирают вибриссы, так как постоянно их используют для поиска пищи (моллюсков) на дне моря. Только у зверей, имеющих травму или воспаление зубов либо челюсти, вибриссы остаются длинными с больной стороны, поскольку раненое животное

ее бережет и не использует (рис.6). В неволе вариантов больше: в зависимости от того, насколько активно конкретное животное использует центральную часть губной подушки, расположенные на ней вибриссы сильно (иногда полностью) стертые, в то время как на боковых поверхностях сохраняются. У иных особей на морде остаются лишь короткие прямые кончики.

Комплекс описанных признаков позволяет точно установить личность моржа.

### Печать прошедших лет

Для того чтобы оценить стабильность признаков известных нам моржей, мы сравнили сделанные в разные годы фотографии одних и тех же животных, принимая во внимание только комплекс описанных нами особенностей морды и шеи каждого из них. Судя по фотографиям 1996–2003 гг. (Московский зоопарк), когда моржам было от 0 до 8 лет, их внешние черты менялись несущественно, и на



Рис.7. Портрет самки моржа Дины в разные годы: сверху — вид справа, внизу — вид слева. За 1998 г. — фото автора, за 2003 г. — А.Шеремета, за 2018 г. фото: верхнее — Д.Рейнхарда (D.Reinhardt), нижнее — Ф.Биммера (F.Bimmer).

фотографиях, сделанных с интервалом в 2–3 года, животные узнаваемы. Единственное затруднение возникло при идентификации животных в возрасте сеюлетков, что связано как с качеством фото- и видеоматериалов 1996–1997 гг., так, вероятно, и с тем, что в этот период формировались индивидуальные признаки. Сравнение моржей из Ижевского зоопарка в 2010–2019 гг., когда животным было от 3 до 13 лет, показало, что их также легко узнать.

А как обстоят дела с долговременным сохранением признаков? Для того чтобы узнать это, мы сравнили портреты моржей Дины, Полосы и Одиннадцатого, сделанные в разные годы на протяжении 21 года — с 1998 по 2019 г. (рис. 7–9).

У Дины были выделены особые приметы, сохранившиеся в течение всей жизни: характерные морщины сбоку морды, двойная морщина над носовым отверстием, депигментированное пятно

чуть ниже ушного отверстия слева, небольшой шрам рядом с носовым отверстием справа и длинноватые, закручивающиеся книзу вибриссы. Тот же стабильный комплекс признаков отличал моржуху Полосу: характерные морщины сбоку морды, шрам у глаза (слева) после пульпита, широкое пространство между вибриссами и морщинами у глаз, вибриссы прямые.

Однако у Одиннадцатого в период с 2002 по 2013 г. (возраст 6–17 лет) внешность изменилась значительно, что, по-видимому, обусловлено половым созреванием. Масса самца увеличилась, на шее появилась «грива». Его морда стала массивнее, старые морщины — глубже, но при этом сохранились шрам от пульпита около правого глаза и характерная складка перед носовым отверстием. Появились и новые морщины на коже: боковые складки соединились над носовым отверстием

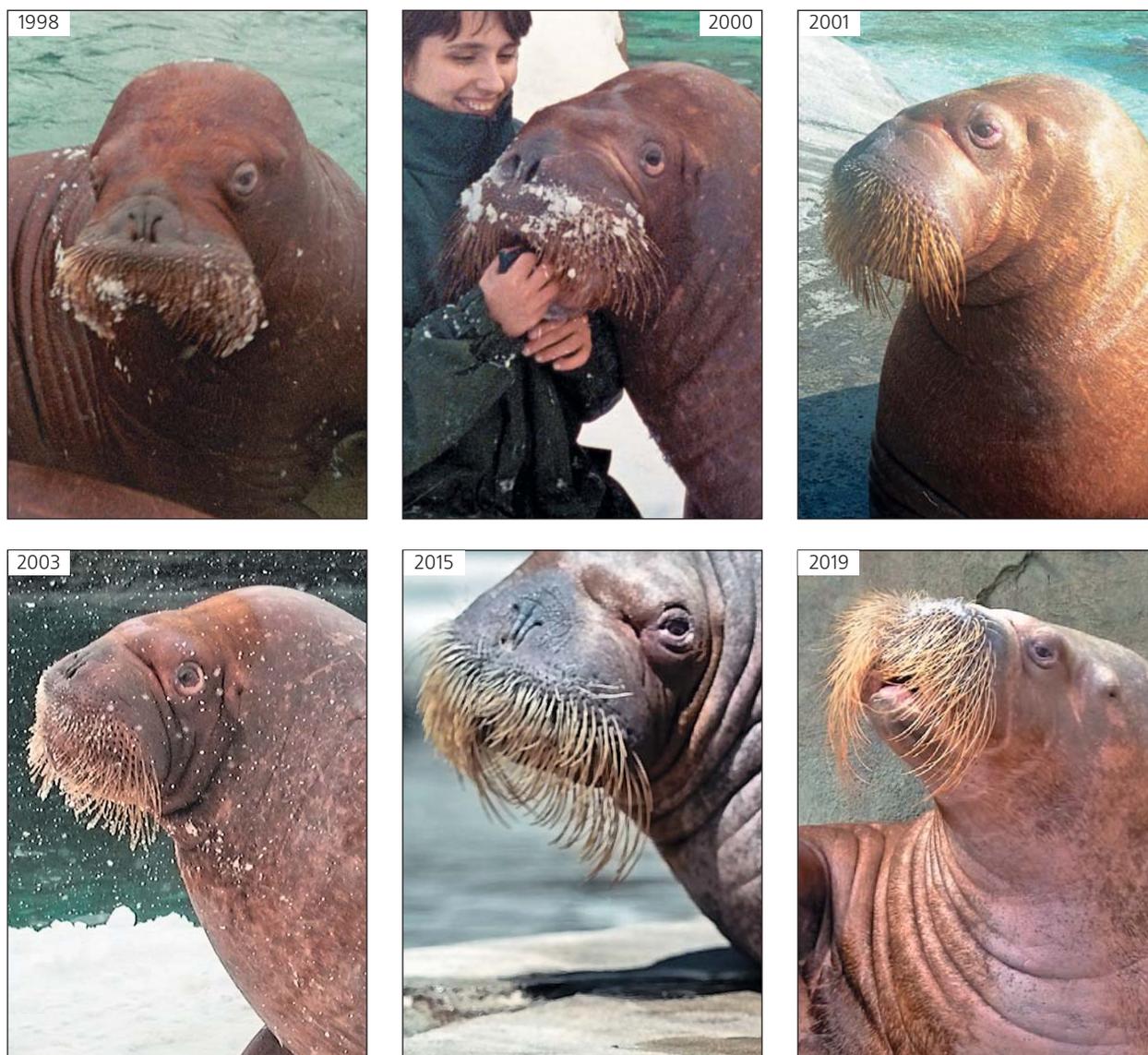


Рис.8. Портрет самки Полосы в разные годы, левая сторона. За 1998, 2000, 2001 гг. — фото автора, за 2003 г. — фото А.Шеремета, за 2015 г. — Ф.Биммера (F.Bimmer), за 2019 г. — Э.Бютна (E.Büttner).

и превратились в глубокую борозду. В таких случаях необходимо периодически обновлять фотографию особи, чтобы иметь дополнительную информацию о возникновении морщин, шрамов, царапин или видоизменении прежних черт. Собственно, у изучаемых морских млекопитающих, как и у людей, должна происходить периодическая «замена паспорта», служащего для легкой идентификации «владельца».

В 1997 г. Эрик Борн и его соавторы [10] выделили ряд признаков, по которым они идентифицировали атлантических моржей в природе: форма, относительный размер и положение бивней; рисунок потертости клыков и облома их концов; размер, расположение и рисунок продольных темных трещин и линий на клыке; рисунок кожных бугров (шишек) в области шеи и грудной клетки; рисунок депигментированных шрамов;

морщины на лбу и шее. По этому комплексу коллеги различали не менее 44 моржей и встречи с одними и теми же животными отмечали на разных участках побережья Гренландии. Метод эффективен для работы с небольшими группами. Мы тоже использовали в своей работе два последних признака из числа названных, но остальные маркеры не всегда применимы в условиях неволи, поскольку, как уже отмечено, в этих обстоятельствах клыки часто удаляют. Даже рисунок кожных бугров в данном случае «не работает»: в природе шишки у самцов начинают появляться с 10 лет, и к 15 годам их достаточно много, однако, несмотря на половую зрелость самцов Одиннадцатого (возраст 23 года) и Энурмина (13 лет), шишек на шее у них нет. Заметим, что Одиннадцатый начиная с 2008 г. пять раз имел жизнеспособное потомство [17].



Рис.9. Портрет самца Одиннадцатого в разные годы: сверху — вид справа, внизу — вид слева. За 1998, 1999, 2002 гг. — фото автора, за 2013 и 2019 гг. — С.Саргэ (S.Saggau).

Итак, моржи, в отличие от других ластоногих, обладают редким волосяным покровом, что позволяет видеть морщины, депигментированные пятна, а также дефекты (шрамы, царапины, кожные поражения). Индивидуальность этих зверей проявляется в хорошо выраженных внешних признаках, расположенных как на морде, так и на теле. С возрастом облик моржей несколько меняется, а у самцов в период полового созревания он трансформируется значительно. С годами у животных добавляются новые складки кожи, пятна, шрамы и т.д., при этом сохраняются и старые отметины, поэтому для поддержания актуальности образа и наблюдений за динамикой внешности нужно периодически обновлять фотографии каждой особи.

В природе метод индивидуальной идентификации трудно применять к тихоокеанскому моржу, так как на берегу животные этого вида формируют многочисленные лежбища, количество особей может достигать нескольких десятков тысяч [15]. Звери отдыхают в плотных залежках, и возникают сложности как с фотографированием каждого из них индивидуально, так и с идентификацией столь большого числа объектов исследования. Однако этот метод прекрасно работает в случае наблюдений за небольшой группой моржей — например, живущих в неволе. Фотоидентификация позволяет составить каталог животных, содержащихся в океанариумах и зоопарках, устанавливая «личность» в случае передачи их в другие океанариумы и следить за их дальнейшей судьбой. ■

Автор искренне благодарна Анне Крюковой, Юрию Рубцову (Ижевский зоопарк), Ольге Марченко и другим коллегам — сотрудникам зоопарков и океанариумов — за предоставленные видео- и фотоматериалы.

## Литература / References

1. Animal marking: recognition marking of animals in research. B.Stonehouse (ed.). Macmillan, L., 1978.
2. Kelly M.J. Computer-aided photograph matching in studies using individual identification: an example from Serengeti cheetahs. *Journal of Mammalogy*. 2001; 82(2): 440–449.
3. Weller D.W., Wursig B., Bradford A.L. et al. Gray Whales (*Eschrichtius robustus*) off Sakhalin Island, Russia: seasonal and annual patterns of occurrence. *Marine Mammals Science*. 1999; 15(4): 1208–1227.
4. McConkey S.D. Photographic identification of the New Zealand sea lion: A new technique. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 1999; 33(1): 63–66. DOI:10.1080/00288330.1999.9516857.
5. Hammond P.S., Mizroch S.A., Donovan G.P. Report of the workshop on individual recognition and estimation of cetacean population parameters. *Reports of the International Whaling Commission*. 1990; 12: 440.
6. Чернецкий А.Д., Краснова В.В. Структура репродуктивного скопления белухи *Delphinapterus leucas* (Pallas, 1776) у острова Соловецкий (Белое море) по результатам фотоидентификации 2007–2013 гг. *Биология моря*. 2018; 44(5): 337–346. DOI:10.1134/S0134347518050066. [Chernetsky A.D., Krasnova V.V. The Structure of the Reproductive Gathering of Beluga Whales, *Delphinapterus leucas* (Pallas, 1776), of Solovetsky Island (White Sea) as Inferred from Results of Photo Identification in 2007–2013. *Russian Journal of Marine Biology*. 2018; 44(5): 394–403.]
7. Forcada J., Aguilar A. Use of photographic identification in capture–recapture studies of Mediterranean monk seals. *Marine Mammal Science*. 2000; 16: 767–793.
8. Forcada J., Robinson S.L. Population abundance, structure and turnover estimates for leopard seals during winter dispersal combining tagging and photo-identification data. *Polar Biology*. 2006; 29(12): 1052–1062. DOI:10.1007/s00300-006-0149-y.
9. Mackey B.L., Durban J.W., Middlemas S.J., Thompson P.M. A Bayesian estimate of harbour seal survival using sparse photo-identification data. *Journal of Zoology*. 2008; 274: 18–27. DOI:10.1111/j.1469-7998.2007.00352.x.
10. Born E.W., Dietz R., Heide-Jurgensen M.P., Knutsen L.III. Historical and present status of the Atlantic walrus (*Odobenus rosmarus rosmarus*) in eastern Greenland. *MoG Bioscience*. 1997; 46: 1–73.
11. Fay F.H., Kelly B.P. Development of a method for monitoring the productivity, survivorship, and recruitment of the Pacific walrus population. Final Report, OCSEAP Study MMS 89–0012. Anchorage, 1989; 51.
12. Cornell L.H., Antrim J.E. Anesthesia and Tusk Extraction in Walrus. *The Journal of Zoo Animal Medicine*. 1987; 18(1): 3–6.
13. Розанова Е.И., Абрамов А.В., Смышнов А.В., Найденов А.И. Экстракция бивней у моржей (*Odobenus rosmarus*). Морские млекопитающие Голарктики. Сборник научных материалов 5-й международной конференции (Одесса, 14–18 октября). М., 2008; 465–467. [Rozanova E.I., Abramov A.V., Smyshnov A.V., Naidenov A.I. Extraction of the tusks in the walruses (*Odobenus rosmarus*). *Marine mammals of the Holarctic. Collection of scientific materials of the 5th international conference (Odessa, October 14–18). Moscow, 2008; 465–467. (In Russ.)*.]
14. Gage L.J., Negrini R., Negrini S., Quihuis D. Prevention of walrus tusk wear with titanium alloy caps. *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> annual conference of the International Association for Aquatic Animal Medicine*. Albufeira, 2002.
15. Крюкова Н.В. Современное состояние группировок тихоокеанского моржа (*Odobenus rosmarus divergens*) на береговых лежбищах Чукотского полуострова. Дисс. ... канд. биол. наук. М., 2015. [Kryukova N.A. The current status of the Pacific walrus groupings (*Odobenus rosmarus divergens*) on the coastal haulouts of the Chukchi Peninsula. *Diss. kand. ... biol. sciences*. Moscow, 2015. (In Russ.)]
16. Крюкова Н.В. Зубная система сеголетков тихоокеанского моржа (*Odobenus rosmarus divergens*). *Зоологический журнал*. 2011; 90(11): 1385–1394. DOI:10.7868/S004451341504008X. [Kryukova N.V. Dentition in Pacific Walrus (*Odobenus rosmarus divergens*) Calves of the Year. *Biology Bulletin*. 2011; 39(7): 618–626. DOI: 10.1134/S1062359012070072.]
17. Reichenbach H. Keeping and Breeding the Walrus at Hamburg's Tierpark Hagenbeck. *International Zoo News*. 2015; 62(5): 359–371.

## Know Me, If You Can: Opportunities of the Identification of Walruses

N.V.Kryukova

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (Moscow, Russia)

The author of the article analyzes in detail the possibilities of photo-identification of walrus in nature and captivity, taking into account the features induced by captive nature of animal breeding. This method of individual recognition has significant advantages in long-term observations of focal animals, although it is advisable to use it only in observations of small groups of animals.

**Keywords:** photoidentification of marine mammals, walrus (*Odobenus rosmarus*), long-term observations.

# Стрекозы — МОСТ МЕЖДУ ВОДНЫМИ И НАЗЕМНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ

К 70-летию со дня рождения А.Ю.Харитонова

О.Н.Попова

Институт систематики и экологии животных СО РАН (Новосибирск, Россия)



*Стрекозы быстрыми кругами  
Тревожат черный блеск пруда,  
И вздрагивает, тростниками  
Чуть окаймлённая, вода.*

О.Э.Мандельштам, 1911

Амфибионтные насекомые (яйца и личинки которых развиваются в воде, а имаго ведут наземный образ жизни) — один из главных биогенных факторов возврата многих химических элементов из водоемов на сушу. В основе статьи 30-летние (1980–2010) исследования, которые велись в Барабинской лесостепи (Западная Сибирь, Россия) под руководством профессора А.Ю.Харитоновой (1949–2013). Мы оценивали количественный и качественный вклад стрекоз в экспорт водной продукции, включая полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) и органический углерод, в наземные экосистемы. Выяснилось, что годовой вылет стрекоз на весь участок суши (190 км<sup>2</sup>) в бассейне оз. Чаны составляет в среднем 408 т сырой массы (124 т сухой массы), а это — 68% от годового вылета всех амфибионтных насекомых. По экспорту органического углерода изученные нами стрекозы сравнимы с растительноядными наземными насекомыми, а по ПНЖК — со всеми другими амфибионтными насекомыми. Таким образом, стрекозы оказались важным проводником водной продукции в лесостепную экосистему.

**Ключевые слова:** амфибионтные насекомые, годовой вылет стрекоз, ПНЖК, органический углерод, лесостепь, Западная Сибирь.



Стрекоза над озером Чаны.  
Здесь и далее фото автора,  
кроме специально отмеченных



**Ольга Николаевна Попова**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии беспозвоночных животных Института систематики и экологии животных СО РАН (Новосибирск). Область научных интересов — фауна, экология, зоогеография, систематика и биология стрекоз.  
e-mail: popova-2012@yandex.ru

**В** мире насекомых стрекозы выделяются крупными размерами, изяществом форм и стремительностью полета. Они с легкостью выписывают в воздухе фигуры высшего пилотажа или просто планируют над водной гладью, цветущим лугом или лесной опушкой. За стрекозой закрепилась репутация создания беззаботного, чему, возможно, способствовала литературно-художественная путаница с басней И.А.Крылова «Стрекоза и муравей». В 1808 г. писатель переложил на русский язык басню «Цикада и муравей» Жана де Лафонтена (1621–1695). Поскольку в России цикада была малоизвестна, Крылов решил заменить ее стрекозой. Однако в то время так называли еще и кузнечика (от слова «стрекотать»), поэтому в басне стрекоза прыгает и поет, что ей совсем не свойственно. На самом деле в трудолюбии она не уступает муравью. К тому же муравьям проще: они живут большими семьями и у них разделение труда — одни дом строят, другие детей нянчат, третьи корм добывают. А стрекозе все самой успевать приходится — и кров найти в непогоду, и потомство оставить, и, главное, прокормиться. Стрекозы, как известно, прожорливые хищники, и немалую (до 20%) долю среди объектов их охоты занимают кровососущие насекомые, которые не только досаждают нам, но и переносят опасные заболевания.

Отряд стрекоз (Odonata) весьма разнообразен. В мировой фауне описано уже более 6 тыс. видов, в нашей стране их около 150, которых как только не именуют — бабка, дедка, коромысло, веретено, стрелка, красотка и т.д., причем эти народные названия использованы в обозначении родов и семейств. Однако не только у систематиков стрекозы вызывают научный интерес. Эти изящные насекомые — удобный и благодатный объект для самых разнообразных исследований. Наше внимание стрекозы привлекли, прежде всего, в связи с их полуводным (амфибионтным) образом жизни — яйца и личинки развиваются в воде, а взрослые насекомые (имаго) живут на суше.



Коромысло помесное на черемухе.

«Я поднял голову и увидел на самом конце тонкой ветки одну из тех больших мух с изумрудной головкой, длинным телом и четырьмя прозрачными крыльями, которых кокетливые французы величают “девицами”, а наш бесхитростный народ прозвал “коромыслами”. Долго, более часа, не отводил я от нее глаз. Насквозь пропеченная солнцем, она не шевелилась, только изредка поворачивала головку со стороны на сторону и трепетала приподнятыми крылышками... вот и все. Глядя на нее, мне вдруг показалось, что я понял жизнь природы, понял ее несомненный и явный, хотя для многих еще таинственный смысл» (И.С.Тургенев).

Принцип существования любой экосистемы — это постоянное движение потоков вещества, энергии и информации в трофических сетях. В основе этого принципа лежит учение В.И.Вернадского (1863–1945) о биосфере, который главную роль в круговороте веществ и энергии отводил живым организмам (авто- и гетеротрофам), производящим «живое вещество» [1].

В настоящее время лучше всего исследован перенос вещества по градиенту абиогенного стока, т.е. из наземных экосистем в водные, и довольно фрагментарно — против градиента стока [2]. Амфибионтные насекомые — один из главных биогенных факторов возврата многих химических элементов из понижений рельефа (из водоемов) на плакоры (от греч. *πλαξ* — плоскость, равнина) [2–4]. Относительно недавно была предложена концептуальная модель, которая обобщает все достоверные данные о потоке водной продукции за счет выплода амфибионтных насекомых [2]. Однако эта модель имеет ряд недостатков. Во-первых, были занижены расчетные средние значения разлета амфибионтных насекомых от берега — не более 100 м, при этом не учтено, что та-



Красноглазка-наяда (слева) и лютка-иноземка.

кие крупные и сильные насекомые, как стрекозы, могут улетать существенно дальше — на многие километры. Во-вторых, в расчетах использованы в основном данные, полученные на водотоках (реках и ручьях), при этом вылет амфибионтных насекомых из озер учтен недостаточно, не говоря уж о незначительных по размерам водоемах (включая временные), которые даже не упоминаются. В-третьих, согласно модели, 60–99% от общего количества вылетевших насекомых составляют двукрылые (комары, мошки), далее в порядке убывания значений идут поденки, веснянки, ручейники и стрекозы. Биомасса стрекоз оказалась заниженной, потому что для учета использовались ловчие садки, которые предназначены в основном для мелких насекомых и не рассчитаны на весьма крупных и высоко подвижных личинок стрекоз. В итоге «недооцененные» стрекозы (как и их места обитания — небольшие и временные водоемы), выпали из расчетов переноса водной продукции в наземные экосистемы.

Экспортируемая из водных экосистем биомасса содержит дополнительный поток органического углерода — источник пищи для наземных консументов (организмов, потребляющих готовые органические вещества). Как известно, в природных экосистемах лишь около 10% органического



Выплод стрекоз — красотки (слева) и бабки.

Фото Е.А.Чибилева

вещества, произведенного на предыдущем трофическом уровне, включается в продукцию последующего уровня, тогда как основная часть этого вещества и заключенной в нем энергии сжигается и рассеивается в процессе метаболизма. Однако среди общего органического вещества выделяют ряд специфических соединений, которые не подвергаются окислению, и их относительная концентрация при продвижении по трофической цепи возрастает. К таким веществам относятся незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты



Белоноска пестрогрудная (слева) и сжатобрюх черный.



Спаривание стрекоз: стрелка красивая (слева) и сжатобрюх обыкновенный.

(ПНЖК) [5], особенно эйкозапентаеновая (ЭПК) и докозагексаеновая (ДГК). Эти кислоты играют ключевую роль в регуляции важнейших физиологических и биохимических процессов позвоночных животных (в том числе человека), которые должны получать ПНЖК с пищей, поскольку сами не способны производить их в необходимых количествах [6]. Синтезируются ЭПК и ДГК в основном в водных экосистемах некоторыми группами микроводорослей [7], а поступают на сушу

при вылете амфибионтных насекомых, в том числе стрекоз. Между тем лишь в нескольких исследованиях был оценен вынос ПНЖК на сушу амфибионтами насекомыми [6, 8–11], а какой вносят стрекозы, и вовсе было неизвестно. Таким образом, у нас возникла идея узнать, сколько водной продукции, включая полиненасыщенные жирные кислоты и органический углерод, переносят стрекозы в наземные экосистемы Барабинской лесостепи [12, 13].



Барабинская лесостепь.

## Бараба — кладовая амфибионтных насекомых

На юго-востоке Западной Сибири в Обь-Иртышском междуречье раскинулась Барабинская лесостепь, Бараба. Равнинные ландшафты чередуются с гривами (длинными пологими возвышениями) и островками березово-осиновых лесов (колков). Барабинская лесостепь — это самый пониженный и, соответственно, заболоченный участок Западно-Сибирской лесостепи. Она изобилует разнообразными водоемами и водотоками (для краткости, далее — водоемы), при этом озера занимают более 4%(!) территории. Для барабинского ландшафта также характерны займища — заросшие тростником и в той или иной степени заполненные водой понижения рельефа. Одни займища связаны с озерами и реками, образуя по их периметру тростниковые бордюры, другие занимают межгривные западины, образуя болота-займища: и те и другие регулярно или эпизодически пересыхают. Общая площадь займищ и временных водоемов в регионе велика и сопоставима с площадью озер. В общем в Барабе покрыто водой более 10% площади [14], что создает все условия для процветания здесь фауны водных и амфибионтных насекомых.

В пресноводных биоценозах Барабы сообщество водных беспозвоночных представлено следующими основными группами: тип членистоногие — класс ракообразные (дафнии, циклопы, остракоды, жаброноги, щитни, бокоплавы), класс насекомые (двукрылые, стрекозы, поденки, ручейники, жуки, клопы), класс паукообразные (водяные клещи, водяные пауки); тип моллюски — брюхоногие моллюски; тип кольчатые черви — олигохеты, пиявки. Насекомые составляют 60% от всех выявленных беспозвоночных.

Амфибионтные насекомые составляют в среднем по численности 68 % от всех насекомых и по биомассе — 47%. Среди амфибионтов доминиру-

ют двукрылые (Diptera), на долю которых приходится 32–80% от всех амфибионтов. Внутри этого отряда преобладают личинки комаров-звонцов семейства Chironomidae (известные как мотыль), которые составили в среднем 58% по численности и 28% по биомассе от всех амфибионтов; для стре-



Примеры займищ (сверху вниз): тростниковые бордюры реки Каргат и озера Фадида, тростниково-осоковое болото в низине.

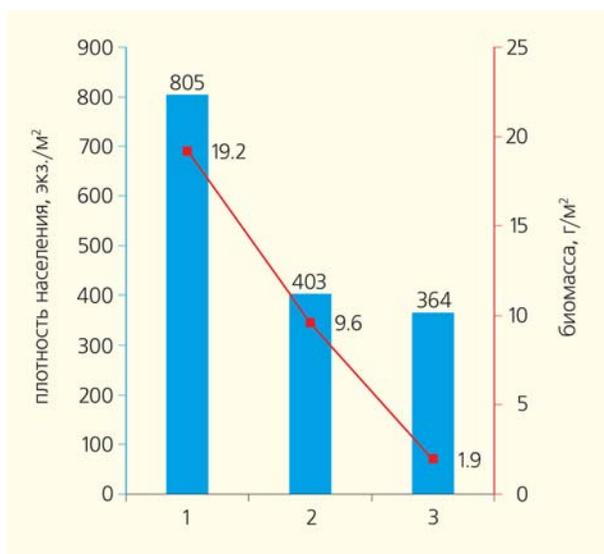


Рис.4. Показатели численности и биомассы насекомых во временном водоеме после перезимовки с водой (1), без воды (2) и постоянном водоеме — озере (3).

коз — 12% и 30% соответственно. Однако, если рассматривать отдельно тростниковые заросли и временные водоемы, то показатели численности (25–51% от всех амфибионтов) и биомассы (37–48%) у стрекоз оказываются существенно выше. На временных водоемах Барабы, несмотря на их периодические пересыхания, формируется более богатое по таксономическому составу и обилию сообщество водных насекомых (в том числе стрекоз), чем в озерах. Это объясняется лучшим прогревом мелководных временных водоемов, отсутствием в них рыб, а также высокой выживаемостью яиц и личинок гидробионтов. Учитывая, что количество таких водоемов велико, следует считать их важным источником вылета амфибионтных насекомых в Барабинской лесостепи.

### Кочевники, летуны, хищники и жертвы

Стрекозы имеют ряд биологических и экологических особенностей, которые определяют их особый экологический статус.

**Любители временных водоемов.** Стрекозы заселяют почти все типы пресноводных водоемов. Большинство видов обитают во временных водоемах естественного и искусственного происхождения (канавах, лужах, болотах, прудах и т.д.). Так, в некоторых ландшафтах (например, в полусухих степях), где большинство водных объектов представляют собой временные лужи и заболоченности, а также на территориях с большими колебаниями уровня обводненности (например, Барабинская лесостепь) стрекозы могут быть количественно важной группой амфибионтных насекомых. Видовое богатство стрекоз на временных водоемах

такое же большое, как и на постоянных, и составляет 50% от одонатофауны Барабы и 31% — Западно-Сибирской лесостепи в целом. Именно во временных водоемах отмечена наиболее высокая численность (100–577 особей/м<sup>2</sup>) личинок стрекоз, на втором месте находятся тростниковые заросли (23–102), во всех остальных типах водоемов численность личинок стрекоз существенно меньше (9–43). Биомасса личинок стрекоз во временных водоемах Барабы может достигать 130 г/м<sup>2</sup> сырой массы и составлять половину и даже более общей зоомассы фитофильных сообществ.

**Активные летуны.** Большая часть активной жизни стрекозы проходит в полете. Стрекозы безраздельно занимают нишу воздушных хищников среди беспозвоночных, подобно птицам среди позвоночных. Только стрекозы могут стартовать из любого положения, развивать скорость полета до 60 км/ч, зависать в воздухе в одной точке, летать не только вперед, но и вбок, вверх ногами, задом наперед, резко разворачиваться на 360° [15]. Именно эти уникальные особенности стрекоз некогда натолкнули на мысль советского авиаконструктора И.И.Сикорского спроектировать вертолет. В течение веков природа выработала у стрекоз приспособление для борьбы с флаттером — вредными колебаниями крыла во время полета: в вершинной части крыла имеется небольшое утолщение кутикулы (птеростигма), куда со всего крыла стекают воздушные потоки и затем гасятся.

**Кочевники.** Практически все виды стрекоз способны к перелетам разной протяженности — от нескольких десятков до нескольких тысяч километров [16]. Среди разных типов миграций стрекоз самый распространенный — кочевание, в результате которого происходит ненаправленное расселение части популяций из мест выплода и осваивание новых территорий с большим количеством водоемов. Такая жизненная стратегия имеет адаптивную значимость, поскольку личинки большинства стрекоз развиваются в мелководных водоемах, существование которых относительно непродолжительно. Кочевание происходит всегда и везде, хотя интенсивность различна у разных видов и бывает максимальной на территориях с нестабильным уровнем обводненности.

**Прожорливые хищники.** Стрекозы играют важную роль в трофических цепях как облигатные и многочисленные хищники. За довольно продолжительный отрезок жизни в водоеме (от нескольких месяцев до нескольких лет) в теле личинки стрекозы аккумулируется значительный по количеству и качеству запас органического вещества. Высокие показатели биомассы также обусловлены крупными размерами личинок (длина тела от 15 до 60 мм), высокой численностью (особенно во временных водоемах), а также невероятной прожор-



Личинки стрекоз (а–в) и объекты их питания (г–е): а — длинка и красotka, б — стрелка, в — серолютка сибирская, г — комар-звонец, д — водяной клоп, е — поденка, ж — малярийный комар (личинка и куколка).

Фото В.В.Глупова

ливостью. Личинка стрекозы за день съедает столько, сколько весит сама и даже больше, а взрослая личинка может достигать 2 г. Эти хищники с удовольствием поедают головастиков лягушек, мальков рыб и себе подобных, но их основной корм — личинки амфибионтных (двукрылых, поденок, веснянок, ручейников) и водных (клопов, жуков) насекомых, а также рачки (дафнии, циклопы).

После превращения личинки в имаго ее аппетит не снижается, поэтому биомасса и сопутствующие ей вещества продолжают накапливаться. Крупная стрекоза может поймать и съесть лягушонка, да и каннибализм ей тоже не чужд. Однако основу рациона взрослых стрекоз составляют мелкие насекомые, прежде всего массовые двукрылые цветочные комарики (*Chironomidae*) и кровососущие комары (*Culicidae*). Больше всего амфибионтных насекомых (хищников и их жертв) скапливается в прибрежных экотонах, граничащих с зоной выплода. Масштабы питания стрекоз удивительны. Так, в Барабинской лесостепи в околководных биоценозах взрослые стрекозы изымают до 300 кг

(целый бык!) сырой биомассы насекомых с гектара за сезон [17].

*Аппетитные создания.* Покинув водоемы, стрекозы включаются в цепи питания наземных экосистем, где они в качестве корма используются консументами более высоких порядков. По нашим оценкам в районе исследований примерно 50% живых и погибших от непогоды стрекоз съедают птицы, 40% — пауки и насекомые (в том числе стрекозы), около 5% — мелкие млекопитающие, амфибии и рыбы (например, при яйцекладке самок) и примерно столько же утилизируют микроорганизмы [12].

Богатые водно-болотные угодья Барабы привлекают на свою акваторию много водоплавающих (гусей, уток, лебедей, чомог, лысух) и околводных (цапель, выпей, куликов, крачек, зук, чак) птиц, среди беспозвоночного корма которых немало личинок стрекоз. Особенно птицы любят полакомиться стрекозами в момент их выплода на водоеме. Нам не раз приходилось наблюдать, как на такой «шведский стол» слетались не только



Взрослые стрекозы за трапезой: а — коромысло помесное ест стрекозу другого вида — сжатобрюха обыкновенного, б — лютка-дриада ест цикаду; в — стрекоза четырехпятнистая ест пару красноглазко-наяд, г — лютка ест типулиду (комара-долгоножку).

Фото автора (а, б) и А.А.Емцева

водные, но и сухопутные птицы, например, воробьи, ласточки, овсянки, скворцы, грачи, которые обычно ловят насекомых в полете. При этом легковесные овсянки склевывали личинок и выплывшихся имаго, сидя на стебле водного растения, а тяжеловесные грачи захватывали в каждую лапу по пучку стеблей и, балансируя над водой, склевывали стрекоз с растений.

### Чановский полигон

Чановский полигон — участок Барабинской лесостепи, на котором проводились исследования в 1980–2010 гг. Полигон находится на территории Новосибирской обл. ( $54^{\circ}32'–54^{\circ}39'$  с.ш.,  $78^{\circ}06'–78^{\circ}19'$  в.д., 105–115 м над у.м.), занимает площадь 272 км<sup>2</sup> и примыкает к северо-восточному берегу оз.Малые Чаны. В центральной части полигона расположен Чановский биологический стационар нашего института, где мы останавливались во время проведения эколого-фаунистических обследований.

*Водные биотопы.* Общая акватория (82 км<sup>2</sup>) Чановского полигона складывается из юго-восточной части оз.Малые Чаны с заливами и отмелями, устьевых участков рек Каргат и Чулым, серии небольших озер с разной степенью минерализации, временных водоемов (придорожных канав, осоковых и тростниковых болот, луж). Анализ проведенных 5000 учетов личинок стрекоз показал, что на относительно небольшой части акватории, которая занята горько-солеными озерами (2 км<sup>2</sup>) и биотопами без водной растительности (11 км<sup>2</sup>), личинки стрекоз отсутствовали или их численность была крайне низкой. Их местообитания расположены в большей части (69 км<sup>2</sup>) акватории, 80% которой занимают временные водоемы и тростниковые займища.

*Наземные биотопы.* В районе Чановского полигона выплод стрекоз из личинок происходит с середины мая до конца сентября. Пространственное распределение стрекоз представляет собой сложную и динамичную картину, но в самом общем виде сводится к разлету от водоемов в кормовые ста-



Скопление выплывшихся стрекоз четырехпятнистых на прибрежном лугу р.Каргат 27 мая 2016 г.: фото выхватывает участок луга в 0.5 м<sup>2</sup> с 30 стрекозами.



Водные биотопы — места обитания личинок стрекоз (левая колонка) и наземные биотопы, где проводились учеты взрослых стрекоз: а — озеро Фадиха, б — река Каргат, в — придорожная канава, г — дорога-трансект между гривой и тростниковым бордюром озера Фадиха, д — залежь на гриве и колок вдали, е — опушка колка (место повышенной концентрации стрекоз).

ции (любые элементы ландшафтов) и возвращению на водоемы в период размножения.

Стрекозы встречались на всей исследуемой сухопутной территории (190 км<sup>2</sup>). В пределах суши было выделено семь основных биотопов, в которых проводились регулярные количественные учеты имаго: увлажненные луга в понижениях рельефа (87 км<sup>2</sup>), остепненные луга и залежи (61), засеянные поля (19), заросли кустарников (11), березово-осиновые колки (8), ползательные лесополосы (3.5) и грунтовые дороги (0.5). Степень видового богатства и обилия стрекоз оказалась прямо пропорциональна степени разнообразия растительности в биотопе. Меньше всего взрослых стрекоз мы обнаружили на засеянных монокультурами полей (2 особи/м<sup>2</sup>), много больше — в древесно-кустарниковых биотопах (23–26). Это и понятно: в лесу и на опушках есть укрытие от непогоды и для самих стрекоз, и для их основных кормовых объектов — двукрылых насекомых.

### Сколько, кого и как учитывали

В основе данной работы наши 30-летние исследования стрекоз в бассейне оз. Чаны, инициатором и руководителем которых был всемирно известный ученый-биолог, одонатолог, профессор Анатолий Юрьевич Харитонов (1949–2013). С 1980 по 2010 гг. мы проводили ежегодные (на протяжении всего летного периода) количественные учеты взрослых стрекоз, и в общей сложности прошли 9031 км, сделав 16 721 учет, в которых зарегистрировали 614 120 особей. Большинство пойманных стрекоз после регистрации выпускали обратно в природу, небольшое количество использовали для морфометрии, взвешивания и биохимического анализа.

В Барабинской лесостепи обитает 44 из 68 видов стрекоз, известных для Западно-Сибирской лесостепи в целом. Для расчета продукции, экспортируемой стрекозами в исследуемые наземные экосистемы, взяли 18 массовых и среднечисленных видов, на которые приходится 95–98 % численности и биомассы стрекоз.

Для изучения видового состава, численности, летного периода, пространственного распределения и перемещения стрекоз мы использовали четыре метода учета имаго, общепринятые в популяционной экологии стрекоз: отлов-мечение-повторный отлов, отлов на время, кошение по травостой и учет на трансекте.

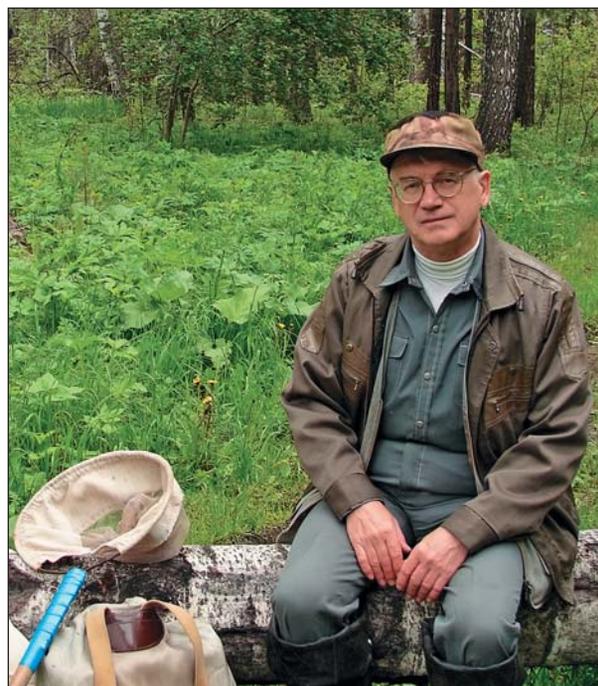
Оценка экспорта водной продукции стрекоз в Барабинскую лесостепь базировалась на среднемноголетнем вылете стрекоз из водоемов общей акваторией в 69 км<sup>2</sup> и распределению их в наземных биотопах совокупной площадью 190 км<sup>2</sup>. Такой подход позволил оценить реальный вылет

имаго стрекоз на сушу за год. В известных нам работах по выносу вещества амфибионтными насекомыми акцент делался, прежде всего, на изучении выхлода насекомых из отдельно взятого водоема и безотносительно их дальнейшего распределения на суше.

*Количественная оценка.* Вылет исследованного населения стрекоз оказался довольно значительным — 27.5–213.3 ос./м<sup>2</sup> акватории за год [13]. Для сравнения годовой вылет с акватории стрекоз из временных водоемов Южной Каролины (США) составил 0.8–8.4 ос./м<sup>2</sup> [8], из малых речек о.Палаван (Филиппины) — 98 ос./м<sup>2</sup> [9].

Напомню, стрекозы нередко рассматриваются как количественно незначительный компонент по сравнению с численностью других амфибионтных насекомых — двукрылых, ручейников и поденок [2]. Однако поток водной продукции правильнее оценивать в единицах биомассы, а не в количестве особей. Годовой вынос стрекозами биомассы с единицы акватории составил в среднем 5.9 г/м<sup>2</sup> сырой массы или 1.8 г/м<sup>2</sup> сухой [13], что в 4–5 раз больше этого показателя у некоторых представителей двукрылых: для кровососущих комаров — 1.25 г/м<sup>2</sup> сырой массы или 0.45 г/м<sup>2</sup> сухой [10], для куликоморфных насекомых — 0.35 г/м<sup>2</sup> сухой массы [11].

По оценкам американских коллег [2], глобальное осаждение органического углерода на сушу при вылете амфибионтных насекомых в пределах 100 м от берега составляет 0.008–0.83 г С/(м<sup>2</sup>·год). В наших исследованиях, в которых учитывались лишь стрекозы и не только вблизи берега, а на бо-



Профессор А.Ю.Харитонов.

лее значительной территории, эта величина оказалась — 0.11–0.70 г С/(м<sup>2</sup>·год) [13]. Таким образом, вклад стрекоз в отложения на землю углерода, базового элемента питания, близок к максимальному значению глобальной оценки для всех амфибионтных насекомых. Годовой вылет стрекоз на весь участок суши (190 км<sup>2</sup>) Чановского полигона составил в среднем 408 т сырой массы (124 т сухой массы), что соответствует 68% (!) от годового вылета амфибионтных насекомых.

*Качественная оценка.* Амфибионтные насекомые, включая стрекоз, обеспечивают не просто питание наземных беспозвоночных и позвоночных хищников, особенно птиц, а высокое качество этого питания, поскольку содержат ПНЖК, в том числе эйкозапентаеновую и докозагексаеновую жирные кислоты. В изученных стрекозах содержание этих особенно ценных соединений составило в среднем 7.9 мг/г сухой массы (2.6 мг/г сырой массы) [13] и оказалось близким к средней глобальной оценке содержания ПНЖК в личинках амфибионтных насекомых — 9.3 мг/г сухой массы [6]. Известно, что стрекоз по этому показателю опережают лишь кровососущие комары — 8.1 мг/г сухой массы [10].

Мы пришли к выводу, что для птиц и других позвоночных взрослые стрекозы имеют среднюю питательную ценность по содержанию ПНЖК по сравнению с другими амфибионтными насекомыми. Однако при рассмотрении потоковых значений этих кислот стрекозы оказываются в лидерах. Так, поток ЭПК и ДГК с выплодом стрекоз в изучаемой лесостепи равен 1.9–11.8 мг/(м<sup>2</sup>·год) [13]. Средняя глобальная оценка потока ПНЖК из водных экосистем в наземные с выплодом амфибионтных насекомых составляет 2.5–11.8 мг/(м<sup>2</sup>·год) [6]. Таким образом, стрекозы экспортировали в изучаемую наземную экосистему такое же количество ЭПК и ДГК, как и все амфибионтные виды насекомых в «средней» экосистеме.

Кроме того у стрекоз особая биоценотическая роль: как крупные и заметные насекомые, они выступают в роли передаточного трофического звена между очень мелкими насекомыми и птицами. Утка, цапля, чайка, кулик, скворец, грач или трясогузка, съев взрослую стрекозу, получают концентрат нескольких тысяч других мелких насекомых.

Таким образом, стрекозы представляют собой важный вектор переноса количества и качества

вещества из воды на сушу в Барабинской лесостепи. Формирование основной биомассы стрекоз происходит на акватории с нестабильным водным режимом — во временных водоемах и периодически пересыхающих займищах.

\* \* \*

Каждая группа амфибионтных насекомых вносит свой вклад в вынос вещества из воды на сушу, но, как мы убедились, стрекозам — облигатным хищникам, многочисленным и крупным насекомым — нет в этом равных. В потоке вещества нуждаются не только наземные консументы, но и почвы Барабинской лесостепи: грядный рельеф способствует быстрому вымыванию склонов талыми и дождевыми водами и сносу в понижения рельефа (в водоемы) большого количества химических элементов.

Амфибионтных насекомых можно образно назвать «живым мостом» между экосистемами — водной и наземной. По мосту, как известно, можно идти в обоих направлениях. Амфибионты не только выносят вещество на сушу, но и возвращают его обратно в водоемы в процессе реализации своего жизненного цикла. Стрекоза откладывает в водоем в среднем 1000 яиц. Чтобы популяция оставалась на стабильном уровне, из тысячи до репродуктивного возраста должны дожить две стрекозы. Если их будет три, популяция уже начнет расти вверх, что не всегда хорошо. Остальные 988 яиц или личинок будут вовлечены в цепи питания в водоеме и никогда не покинут его пределов.

Как выяснилось, стрекозы не просто входят в пищевую цепочку, связывающую водных и сухопутных обитателей, но и пронесут по этой цепи необходимый для наземных организмов компонент питания (длинноцепочечные ПНЖК) в количествах, сопоставимых с другими амфибионтными насекомыми. Вырабатываются эти кислоты только в водоемах, а нужны, между тем, даже тушканчику, живущему в далекой и жаркой пустыне. И только стрекозы, способные мигрировать на тысячи километров, разносят этот полезный «продукт» по всему миру.

Вот так стрекоза! Совсем не попрыгунья и не пелуныя, а летунья и трудяга... серьезная хищница. И мало ли какие еще загадки хранят в себе эти удивительные насекомые...■

*Автор благодарит М.А.Харитонову, семью Щербаковых и Д.Л.Сластину за помощь в проведении полевых работ, а также директора ИСиЭЖ В.В.Глунова за идейное вдохновение на обработку многолетних материалов, М.И.Гладышева за плодотворное сотрудничество в изучении биохимической составляющей вылета стрекоз. Особая благодарность Д.И.Берману за идею написания этой научно-популярной статьи.*

**Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственной академии наук на 2013–2020 гг. (проект VI.51.1.7. (AAAA-A16-116121410123-1), а также Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 04-04-48778-а, 08-04-00725-а, 08-04-00698-а, 12-04-00824-а и 18-04-00725-а).**

## Литература / References

1. *Вернадский В.И.* Живое вещество. М., 1978. [*Vernadsky V.I.* Living Matter. Moscow, 1978. (In Russ.).]
2. *Gratton C., Vander Zanden M.J.* Flux of aquatic insect productivity to land: comparison of lentic and lotic ecosystems. *Ecology*. 2009; 90(10): 2689–2699. DOI:10.1890/08-1546.1.
3. *Baxter C.V., Fausch K.D., Saunders W.C.* Tangled webs: reciprocal flows of invertebrate prey link streams and riparian zones. *Freshw. Biol.* 2005; 50: 201–220. DOI:10.1111/j.1365-2427.2004.01328.x.
4. *Ballinger A., Lake P.S.* Energy and nutrient fluxes from rivers and streams into terrestrial food webs. *Mar.Freshw.Res.* 2006; 57(1): 15–28. DOI:10.1071/mf05154.
5. *Gladyshev M.I., Sushchik N.N., Anishchenko O.V. et al.* Efficiency of transfer of essential polyunsaturated fatty acids versus organic carbon from producers to consumers in a eutrophic reservoir. *Oecologia*. 2011; 165(2): 521–531. DOI:10.1007/s00442-010-1843-6.
6. *Gladyshev M.I., Arts M.T., Sushchik N.N.* Preliminary estimates of the export of omega-3 highly unsaturated fatty acids (EPA+DHA) from aquatic to terrestrial ecosystems. *Lipids in Aquatic Ecosystems*. NY, 2009; 179–209. DOI:10.1007/978-0-387-89366-2-8.
7. *Tocher D.R., Leaver M.J., Hodson P.A.* Recent advances in the biochemistry and molecular biology of fatty acyl desaturase. *Prog. Lipid Res.* 1998; 37: 73–117. DOI:10.1016/S0163-7827(98)00005-8.
8. *Leeper D.A., Taylor B.E.* Insect emergence from a South Carolina (USA) temporary wetland pond, with emphasis on the Chironomidae (Diptera). *J. N. Amer. Benthol. Soc.* 1998; 17: 54–72. DOI:10.2307/1468051.
9. *Freitag H.* Composition and longitudinal patterns of aquatic insect emergence in small rivers of Palawan Island, the Philippines. *Int. Rev. Hydrob.* 2004; 89: 375–391. DOI:10.1002/iroh.200310710.
10. *Гладышев М.И., Сущик Н.Н., Юрченко Ю.А. и др.* Различия жирнокислотного состава личинок и имаго кровососущих комаров и вынос незаменимых кислот из воды на сушу. *ДАН*. 2011; 441(2): 282–285. [*Gladyshev M.I., Sushchik N.N., Yurchenko Yu.A. et al.* Differences in the fatty acid compositions of blood-sucking mosquito larvae and imagoes and the water-to-land export of essential acids. *Doklady Biological Sciences*. 2011; 441(1): 385–388. DOI:10.1134/S001249661106007X.]
11. *Дёмина И.В.* Роль куликоморфных насекомых (Diptera, Nematocera) в формировании потоков вещества и энергии через границу «вода–воздух» пойменных озер Волги: дис. ... канд. биол. наук. Саратов, 2014. [*Djomina I.V.* Role of culiciform insects (Diptera, Nematocera) in formation of the matter and energy flows through the “water-air” border of the floodplain lakes of the Volga River. Ph.D. (Biology) diss. Saratov, 2014. (in Russ.).]
12. *Попова О.Н., Харитонов А.Ю.* Оценка выноса вещества стрекозами из водоемов на сушу в лесостепи Западной Сибири. *Сиб. экол. жур.* 2012; 19(1): 49–56. [*Popova O.N., Haritonov A.Yu.* Estimation of the carry-over of substances by dragonflies from water bodies to land in the forest-steppe of West Siberia. *Contemp. Probl. Ecol.* 2012; 5(1): 34–39. DOI:10.1134/S1995425512010043]
13. *Popova O.N., Haritonov A.Yu., Sushchik N.N. et al.* Export of aquatic productivity, including highly unsaturated fatty acids, to terrestrial ecosystems via Odonata. *Sci. Tot. Environ.* 2017; 581–582: 40–48. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.017.
14. *Природные условия и естественные ресурсы СССР: Западная Сибирь.* Ред. Г.Д.Рихтер. М., 1963. [Natural Conditions and Natural Resources of USSR: Western Siberia. Rikhter G.D. (ed.) Moscow, 1963. (In Russ.).]
15. *Bode-Oke A.T., Zeyghami S., Dong H.* Flying in reverse: kinematics and aerodynamics of a dragonfly in backward free flight. *J. R. Soc. Interf.* 2018; 15(143): 20180102. DOI:10.1098/rsif.2018.0102.
16. *Haritonov A., Popova O.* Spatial displacements of Odonata in south-west Siberia. *Int. J. Od.* 2011; 14(1): 1–10. DOI:10.1080/13887890.2011.568188.
17. *Сухачева Г.А., Харитонов А.Ю., Перевозчикова Т.Ю.* Количественная оценка питания стрекоз. *Изв. СО АН СССР. Сер. биол. наук.* 1988; 3(20): 3–7. [*Sukhacheva G.A., Haritonov A.Yu., Perevozchikova T.Yu.* Quantitative evaluation of feeding of dragonflies. *Izv. Sib. Otd. Akad. Nauk SSSR. Ser. Biol. Nauki.* 1988; 3(20): 3–7. (In Russ.).]

## Odonates are a Bridge between Aquatic and Terrestrial Ecosystems

### On the 70th Anniversary of A.Yu.Haritonov

O.N.Popova

Institute of Systematics and Ecology of Animals, Siberian Branch of RAS (Novosibirsk, Russia)

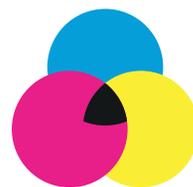
Amphibiotic insects, whose eggs and larvae develop in water and adults are terrestrial, are one of the main biogenic factors in the returning a lot of chemical elements from water bodies to the land. The article is based on 30-year (1980–2010) studies conducted in the Barabinsk forest-steppe (Western Siberia, Russia) under the leadership of A.Yu. Haritonov (1949–2013). We measured the quantitative and qualitative contribution of odonates (Odonata) to the export of aquatic production, including highly unsaturated fatty acids (HUFA) and organic carbon, to terrestrial ecosystems. It turned out that the annual emergence of odonates for the whole land area (190 km<sup>2</sup>) in the basin the Chany Lake is an average of 408 tons of wet weight (124 tons of dry weight), and this is 68% of the annual emergence of all amphibiotic insects. Export of organic carbon via studied odonates is comparable to herbivorous terrestrial insects, and of HUFA, to all other amphibiotic insects. Thus, odonates appeared to be a vital conduit of aquatic productivity to forest-steppe ecosystem.

**Keywords:** amphibiotic insects, annual emergence of odonates, highly unsaturated fatty acids, organic carbon, forest-steppe, Western Siberia.



Типографии ФГУП "Издательство "Наука"  
[www.tnauka.ru](http://www.tnauka.ru)

- ▶ Разумная ценовая политика
- ▶ Высокое качество продукции
- ▶ Реальные сроки выполнения заказов
- ▶ Работа высококлассных профессионалов



- переплетные работы
- тиснение фольгой
- цифровая печать
- офсетная печать
- ламинирование
- цветоделение
- сканирование
- брошюровка
- лакирование
- цветопроба
- нумерация
- высечка
- верстка
- СТР



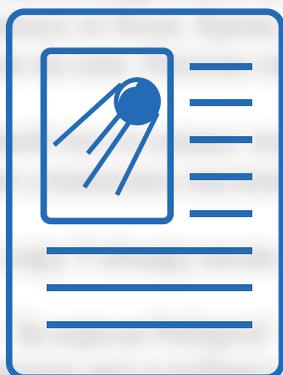
- ◆ Удобное месторасположение
- ◆ Тиражи от 20 экземпляров

- афиши
- календари
- удостоверения
- адресные папки
- визитные карточки
- фирменные бланки
- брошюры, журналы
- эксклюзивные издания
- полноцветные плакаты
- художественные альбомы
- книги в твердом переплете
- листовки, рекламные буклеты
- наклейки на бумажных материалах

Москва

Санкт-Петербург

Новосибирск



НАУКА

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

*Добро пожаловать  
в электронную библиотечную систему  
Издательства «Наука»!*

Электронная библиотечная система Издательства «Наука» – это простой и удобный доступ к огромной коллекции статей и книг, входящих в портфолио «Науки»

**Электронная библиотечная система это:**

- научная, научно-популярная и классическая литература, от статей до монографий
- оперативное обновление новинок благодаря тесной интеграции с редакционно-издательской системой «Науки»
- разветвленный тематический каталог
- простая и эффективная система поиска
- интуитивная и простая система оформления заказа и подписок
- прозрачная система статистики
- надежность доступа и стабильность работы

*Присоединяйтесь к миру «Науки»!*

# Опасные «нелавиноопасные» склоны

Д.А.Боброва<sup>1</sup>, Е.Н.Казакова<sup>1</sup>, Н.А.Казаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (Южно-Сахалинск, Россия)





Лавина, сошедшая у автодороги Шebuнино—Горнозаводск в марте 2018 г.

Фото Е.Н.Казаковой

Работа посвящена проблеме формирования лавин на склонах, которые обычно считаются безопасными. Рассмотрены лавины спорадические, на низких склонах, в лесу, а также сходящие с частично покрытых снегом склонов. Их не учитывают при оценке лавинной опасности территории, и это часто приводит к экономическому ущербу и человеческим жертвам. Многочисленные случаи формирования лавин на склонах, которые были определены как нелавиноопасные, показывают, что любой склон относительной высотой более 5 м с уклоном 25–50° потенциально опасен вне зависимости от повторяемости лавин и характера растительности.

**Ключевые слова:** лавинная опасность, спорадические лавины, лавины на низких склонах, лавины в лесу.



**Дарья Андреевна Боброва**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова научно-исследовательского центра изучения и контроля геосистем переходных зон Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН. Занимается изучением географии и динамики лавин.  
e-mail: darya-kononova@yandex.ru



**Екатерина Николаевна Казакова**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Область научных интересов — снежный покров, лавинные и селевые процессы.  
e-mail: kazakova-e-n@ya.ru



**Николай Александрович Казаков**, кандидат геолого-минералогических наук, директор того же научно-исследовательского центра. Изучает лавинные и селевые процессы, снежный покров, физику снеголавинных процессов.  
e-mail: ncn\_2001@mail.ru

Еще в середине XX в. известный специалист по изучению лавин Вальтер Фляйг предостерегал от ошибок тех, кто считал склон нелавиноопасным только потому, что на нем не наблюдался сход лавин [1]. Подобные предупреждения можно встретить в публикациях и других исследователей. Тем не менее и в наши дни, когда по всему миру собрано достаточно сведений о лавинных катастрофах редкой повторяемости, встречается ошибочный подход к определению степени опасности и к выбору мероприятий по защите от

лавин. И действительно, при картировании лавиноопасных территорий в качестве одной из основных характеристик иногда используют такой показатель, как повторяемость лавин [2]. Многие считают, что опасны лишь те участки склонов, на которых когда-либо сходили лавины. Если же катастроф еще не случилось, то склон можно считать безопасным\*. Противолавинные сооружения часто строят лишь в местах, где уже имеются сведения о сходе лавин. Так, в австрийском Гальтюре это привело к трагедии. В 1999 г. лавина сошла со склона, который не был защищен, поскольку за многолетний период наблюдений отсутствовали сведения о формировании здесь лавин [3]. Тогда погиб 31 человек. Огромная масса снега разрушила значительную часть горного поселка. Чтобы не допустить повторения подобных катастроф, при прогнозировании схода лавин мы предлагаем не ориентироваться на их повторяемость, а опираться исключительно на гидрометеорологические и геоморфологические факторы лавинообразования. Рассмотрим особенности формирования лавин на склонах, считающихся безопасными, на примере Сахалинской обл.

Кроме частоты схода лавин в качестве основного критерия опасности на практике часто рассматривают относительную высоту склона. Например, низкие склоны (ниже 30 м) не принято считать опасными [2]. Однако на всей территории России, и в том числе на Сахалине, известны случаи, когда с таких склонов сходили лавины. Это может произойти как в горной местности, так и на равнинах. Такие лавины часто приводят к разрушениям зданий и сооружений. Кроме того, известно множество случаев, когда в лавины с низких склонов попадали люди, нередко они при этом даже погибали [4, 5].

Еще одно распространенное заблуждение заключается в том, что лес на склоне служит естественной защитой и может полностью исключить риск образования лавины [6–9]. Несмотря на то что наличие леса действительно может снижать частоту формирования лавин, оно не гарантирует полную безопасность. Так, снеговая масса, оторвавшаяся выше линии леса, способна уничтожить на своем пути деревья толщиной более 30 см [10].

Бывает, что снег сдувается ветром с опасного участка и аккумулируется в ложбинах. В результате лавины сходят при очень малой толщине снежного покрова. Это также довольно частое явление на морских берегах Сахалина.

Таким образом, необходимо изменить наши представления о распространении лавин, поскольку зафиксированы многочисленные случаи их формирования на склонах, которые ранее были опре-

делены как безопасные. Например, на картах лавинной опасности территории Российской Федерации [2, 11] обозначены не все регионы, где наблюдался сход лавин [5]. Безусловно, такие карты дают хорошее представление о самых опасных районах нашей страны, однако дополнение к ним помогло бы расширить географию лавинной опасности.

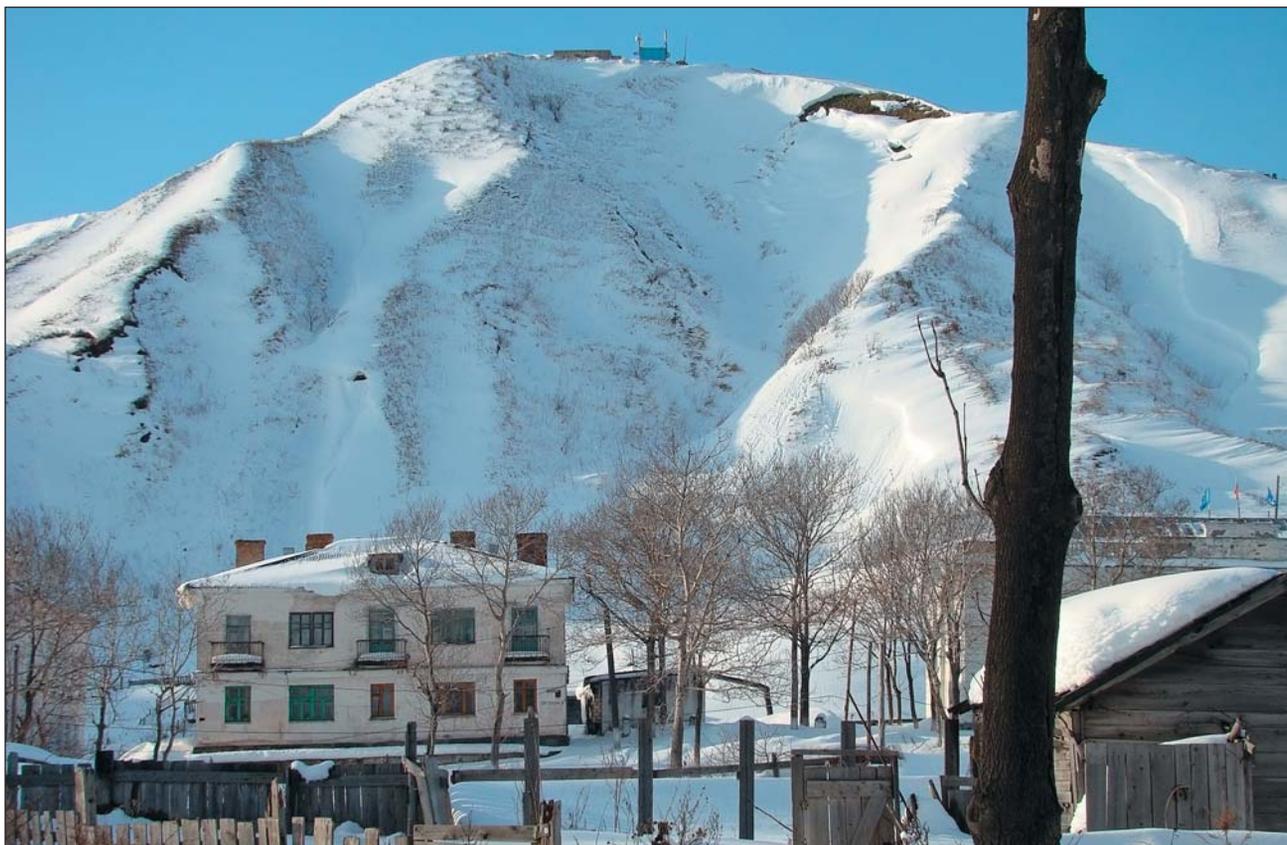
### Спорадические лавины

Довольно часто встречаются лавиносорбы, параметры которых достаточны для регулярного формирования лавин, но тем не менее они не образуются. Порой за всю историю наблюдений в таких местах ни разу не фиксируется сход снега, либо лавины имеют небольшие объемы и не представляют опасности. Однако внезапно случается крупная катастрофа. Такие лавины называют спорадическими (лавинами редкой повторяемости). Они сходят не чаще одного раза в 50–100 лет в результате сочетания особых, редких для района метеорологических условий и уникальных характеристик снежного покрова [12]. Примером именно такой лавины служит случай в Гальтюре. А совсем недавно, 18 января 2017 г., катастрофа случилась в центрально-итальянской провинции Аbruццо, в горах Гран-Сассо-д'Италия. Огромная масса снега разрушила отель и унесла жизни 29 человек. Лавина образовалась в результате длительного снегопада и серии подземных толчков и сошла предположительно сразу из нескольких очагов. До этого сход лавины был зафиксирован здесь в 1936 г. [13].

На Сахалине спорадическая лавина сошла 13 января 2014 г. в с. Чехов на юго-западном побережье острова. Высота склона составляла 120 м, а уклон в зоне отрыва — 45°. В результате происшествия была разбита шлакоблочная трансформаторная будка и повреждены окна и дверь в здании школы. Населенный пункт существует с 1945 г. За все это время, согласно архивным данным [14–16] и опросам местного населения, случаев схода лавин в этом месте не наблюдалось.

После схода спорадических лавин нередко принимается решение о строительстве защитных инженерных сооружений. Но строятся они лишь в том лавиносорбе, где случился отрыв снега. Соседние склоны при этом игнорируются — до тех пор, пока и там не сформируются лавины. Так произошло, например, на склоне у железной дороги Южно-Сахалинск—Оха в Макаровском р-не на юго-восточном побережье Сахалина. 31 декабря 2009 г. здесь сошла лавина, в результате чего погибли два человека и были сброшены с путей тепловоз и снегоочиститель. После этого события лавиносорбы застроили снегоудерживающими сооружениями. Но соседние склоны, с которых тоже

\* [www.offsk.com/single-post/avalanchedanger](http://www.offsk.com/single-post/avalanchedanger)



Лавинобор спорадической лавины, сошедшей 13 января 2014 г. в с.Чехов.

Фото Д.А.Бобровой



Выборочная застройка склона снегоудерживающими сооружениями на лавиноопасном участке железной и автомобильной дороги Южно-Сахалинск—Оха протяженностью около 1.5 км.

Фото Е.Н.Казаковой

сходят лавины на полотно железной дороги, так и остались незащищенными.

Таким образом, частота формирования лавин может учитываться только при определении зон воздействия лавин частой повторяемости — к примеру, для оценки предполагаемых затрат на расчистку от снежных завалов автомобильных и железных дорог. При строительстве жилых домов и промышленных объектов границы лавиноопасных зон следует определять по максимальной дальности выброса лавин редкой повторяемости.

### Лавины на низких склонах

Упоминания о лавинах на низких склонах, в том числе на равнинах, в литературе встречаются часто [17–21]. Однако работ, полностью посвященных проблеме недоучета лавинной опасности, не так много. В одной из первых приводилась статистика пострадавших и погибших людей [4]. Также было подсчитано, что в России из 20 человек, ежегодно погибающих в лавинах, один-два гибнут на равнинных территориях [22]. Предлагалось

считать лавиноопасным склон относительной высотой от 5 м, также была составлена карта лавинной опасности равнин [5, 23].

Однако до сих пор низкие склоны (высотой менее 30 м) часто не воспринимаются как лавиноопасные. Это склоны морских, речных и озерных террас и берегов, оврагов, бугров пучения, а также различных антропогенных форм — откосов, отвалов, насыпей, выемок и т.п. относительной высотой более 5 м. Низкие склоны повсеместно распространены на всей равнинной территории России, там, где не принято рассматривать лавинную опасность как угрозу населению и хозяйству. Конечно, чаще всего в мало- и среднеснежные зимы лавины с таких склонов не сходят, но уж если сходят, то становятся неожиданностью. Только за последние 10 лет на территории России в лавины с низких склонов попали 36 человек, 17 из них погибли (причем это только достоверно известные случаи). Произошло это на склонах речных террас, оврагов и различных насыпей в Татарстане и Башкирии, в Оренбургской, Свердловской, Магаданской и Сахалинской областях, в Пермском крае [4, 5].



Склон речной террасы р.Найбы (пос.Быков) высотой 27 м. В 2007 г. здесь сошла лавина, повлекшая за собой гибель человека.

Фото Ю.В.Генсиоровского

Высота фронта смешанного снега, обрушающегося со склона высотой 25–30 м, может достигать 4.0–4.5 м [21]. Так, в 2007 г. в пос.Быков на юге Сахалинской обл. со склона речной террасы высотой 27 м сошла лавина, в которой погиб человек.

За всю историю наблюдений за лавинами на Сахалине (1928–2018) достоверно известно о девяти случаях попадания людей в лавины с низких склонов (30–35 м и ниже). В общей сложности пострадали 39 человек, 33 из них погибли. Преобладающая часть таких лавин сошла со склонов морских и речных террас.

В большинстве случаев лавина накрывает от 1 до 3 человек, однако случается и большее количество жертв. Например, в 1950 г. в с.Неводском Томаринского р-на лавина, сошедшая со склона морской террасы, разрушила два барака. Погибли 24 человека. Превышение лавиносбора составляло всего 35 м, средний уклон — 32° [16].

На Сахалине зафиксировано пять случаев антропогенных лавин (сошедших в результате действия человека) с низких склонов, вызвавших травмы и гибель людей. В них попали девять человек, четверо погибли. Чаще всего жертвами становились дети, катающиеся со склонов, а также туристы (лыжники, снегоходчики). Подобный случай произошел в январе 2018 г., когда два снегохода спустились лавину со склона речной террасы высотой 4 м в районе с.Чапланова. В феврале 2018 г. в долине р.Быстрой возле с.Огоньки Невельского р-на в лавину со склона высотой 5 м попали два человека.

Часто бывает, что люди погибают или получают травмы в лавинах очень маленького объема. Так, на Сахалине в лавины объемом от 10 до 50 м<sup>3</sup> попали 13 человек, четверо из них погибли.

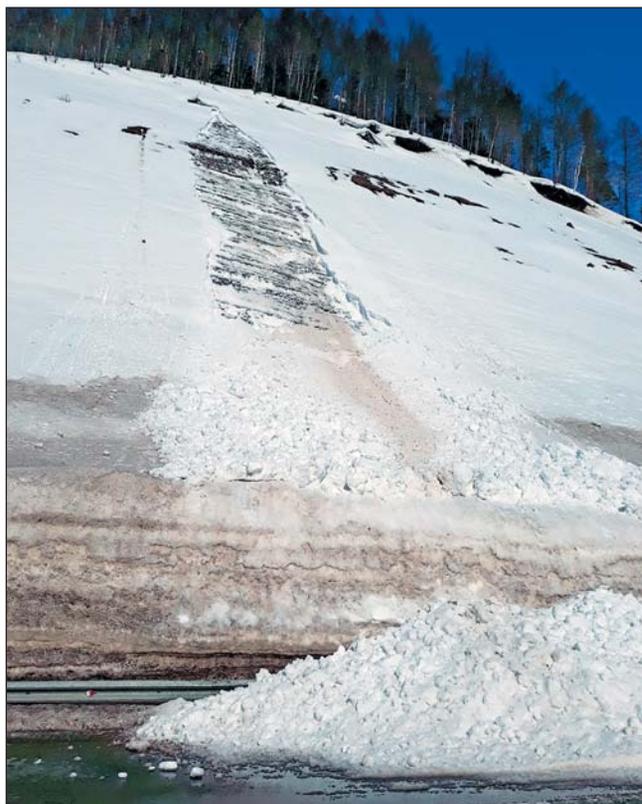
При анализе лавинной опасности необходимо отдельно выделить искусственно созданные склоны (откосы различных насыпей и выемок, бермы карьеров и т.п.). В многоснежных регионах они лавиноопасны, если их крутизна составляет 30–50°. В большинстве случаев высота таких склонов невелика (5–50 м), а объемы лавин с них редко достигают 1 тыс. м<sup>3</sup>. Тем не менее такие лавины в разных регионах России неоднократно вызывают экономический ущерб и нередко приводят к человеческим жертвам. Чаще всего в небольшие лавины с антропогенных склонов попадают дети [24]. В 1987 г. в Томаринском р-не с откоса железнодорожной выемки высотой всего 10 м после метели производился искусственный спуск лавин. В результате сошел осов (снежный оползень), который засыпал дрезину и четверых человек, один из которых погиб. В 2004 г. два человека погибли в лавине с откоса шахтного отвала в п.Ударном (Сахалинская обл.).

Подобные случаи зафиксированы не только на территории Сахалинской обл. Так, в январе 2008 г.



Антропогенная лавина, сошедшая со склона речной террасы высотой 4 м в результате проезда снегохода.

Фото очевидца



Искусственный склон у автодороги Южно-Сахалинск—Холмск и снежный оползень (осов), сошедший с него 25 марта 2018 г.

Фото Д.А.Бобровой

в Республике Татарстан три человека попали в лавину со склона карьера в пос. Киндери. В это же время в пос. Бугульма девять человек оказались под снегом, рухнувшим с железнодорожной насыпи. Четверо из них погибли.

Много низких лавиноопасных склонов в Сахалинской обл. искусственно создано при прокладке дорог. Такие склоны имеют относительную высоту 5–30 м и уклон 30–50°. Они покрыты травой или щебнем. Все это обеспечивает условия, благоприятные для образования лавин. Их объем обычно небольшой (до 1 тыс. м<sup>3</sup>), а ущерб выражается главным образом в завалах дорожного полотна.

Таким образом, склоны морских и речных террас, оврагов, откосы железнодорожных и автомобильных насыпей, выемок, карьеров, отвалов (снега, грунта, горных пород, мусора и т.д.) высотой более 5 м и крутизной от 30 до 50° при толщине снежного покрова более 30 см становятся лавиноопасными и представляют постоянную угрозу для населения.

### Лавины в лесу

Лес на склонах часто рассматривается как один из видов противолавинной защиты. Несмотря на то что многие профессиональные лавинщики не согласны с этим, такое заблуждение продолжает существовать как в научных работах, так и на различных интернет-ресурсах, создавая у читателей ложное мнение [6–9]. Безусловно, наличие леса в лавиносборах способствует уменьшению частоты схода и объемов лавин, но не препятствует в полной мере их формированию на склонах крутизной более 35°.

Влияние леса на лавинные процессы и условия схода лавин редкой повторяемости, сформировавшихся выше границы леса, достаточно хорошо изучено [25–27]. В то же время практически не исследована проблема отрыва снежных масс среди леса. Изучение этого явления особенно важно при разработке противолавинных мероприятий для лесистых низкогорий и среднегогорий Сахалина [10].

В сильно залесенных (с площадью проективного покрытия 70–100%) среднегорьях и низкогорьях Сахалина лавины образуются из-за специфического метаморфизма снежной толщи. Отрыв снега возможен при достижении всей толщи или каким-либо ее слоем стадии конструктивного метаморфизма. При этом должны соблюдаться дополнительные условия: снегопад, повышение температуры воздуха до положительных значений, формирование в верхней части снежного разреза влажного (мокрого) слоя, антропогенное воздействие на снежный пласт на склоне и т.п. [28].

В каменноберезовом и елово-каменноберезовом лесу на высотах до 800–850 м лавины объемом от 100 до 300 тыс. м<sup>3</sup> сходят ежегодно, до пяти раз в течение зимы. В Восточно-Сахалинских и Западно-Сахалинских горах (Средний Сахалин) количество лавиносборов, покрытых лесом, достигает 50% от их общего числа.

В пихтово-еловом лесу лавины объемом от 100 до 500 м<sup>3</sup> с дальностью выброса до 200 м сходят на склонах крутизной 35–45°. Они формируются в среднем раз в 5–7 лет и представляют опасность для людей, находящихся вне помещений, и для транспортных средств.

В смешанном елово-березовом лесу отрыв лавин объемом от 100 до 1000 м<sup>3</sup> с дальностью выброса до 300 м происходит на склонах крутизной до 45°. Так, в январе 1985 г. лавина объемом 400 м<sup>3</sup>, сошедшая со склона горы Джамбул (пос. Санаторный, Мицунский хребет, южная часть Сахалина), поросшего густым смешанным лесом, разрушила шлакоблочное здание с бетонными перекрытиями, расположенное у подножия склона. В январе 1996 г. на автомобильной дороге Первомайское–Пиленгский перевал–Пограничное (Восточно-Сахалинские горы) в такой лавине погиб человек, вышедший из автомобиля на дорожное полотно.

При разработке мероприятий противолавинной защиты необходимо учитывать тот факт, что даже густой хвойный лес, высаженный в лавиносборе, где уклоны превышают 35°, не всегда может гарантировать абсолютную безопасность.

### Лавины с «бесснежных» склонов

На побережье Сахалина снег часто выдувается ветром с большей части лавиноопасного склона и скапливается в понижениях и ложбинах. В этих случаях возможен сход лавин с практически бесснежного склона: лавины сходят из надувов при незначительной (менее 30 см) толщине снежного покрова или даже его полным отсутствием на большей части склона. Такое произошло, например, 30 января 2013 г. на 17 км автодороги Шебунино–Невельск (западное побережье Южного Сахалина). Лавина сошла после низовой метели при северном ветре, способствовавшем снегонакоплению на бортах юго-юго-западной экспозиции. Высота снежного покрова на бортах северо-северо-восточной экспозиции в то время не превышала 20 см. Объем лавины составил 2400 м<sup>3</sup>. Она представляла собой твердую снежную доску и не дошла до автодороги всего 6 м. В марте 2018 г. вдоль 10-километрового участка автодороги Шебунино–Горнозаводск мы обнаружили четыре такие лавины, две из которых завалили дорогу.

Таким образом, из-за снегопереноса сход лавин из сформировавшихся в ложбинах надувов



Лавины, сошедшие из надувов в боковых частях лотковых лавиносборов у автодороги Шебунино—Горнозаводск на западном побережье Южного Сахалина в январе 2013 г. (вверху) и марте 2018 г. (внизу).

Фото Е.Н.Казаковой

возможен даже при отсутствии снежного покрова в большей части лавиноопасного склона.

\* \* \*

За время многолетних наблюдений за лавинами мы пришли к выводу, что их формирование возможно на любом склоне высотой от 5 м вне зависимости от степени его залесенности и при наличии даже небольшой площади, покрытой снегом.

Частота формирования лавин не может быть одним из главных критериев определения лавинной опасности при проектировании и строительстве капитальных зданий и сооружений, однако при строительстве линейных объектов (дорог) повторяемость лавин должна учитываться, к примеру, для оценки затрат на расчистку от снежных завалов.

Для того чтобы избежать лавинных катастроф в будущем, необходимо определять максимально

возможные границы действия лавин: дальность выброса снега и воздушной волны, а также ширины фронта.

Необходимо также учитывать лавинную опасность и на равнинах, поскольку даже склон оврага или речной террасы представляет угрозу для человека. Лавиноопасными могут быть и искусственно созданные склоны.

География лавинной опасности гораздо шире, чем она представлена в современном лавиноведении. Подходы к определению опасности устарели, это подтверждается многочисленными случаями формирования лавин на склонах, которые были определены как нелавиноопасные. Единственно верное решение вопроса безопасности — это определение любого склона как потенциально лавиноопасного, а также расчет максимальных параметров лавин при проведении оценки лавинной опасности для капитального строительства. ■

## Литература / References

1. Фляйг В. Внимание, лавины! М., 1960. [Fleig V. Attention, avalanches! M., 1960. (In Russ.).]
2. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Ред. В.М.Котляков. М., 1998. [World Atlas of Snow and Ice Resources. Kotlyakov V.M. (ed.). Moscow, 1998. (In Russ.).]
3. Höller P. Avalanche hazards and mitigation in Austria: a review. *Natural Hazards*. 2007; 43(1): 81–101. DOI:10.1007/s11069-007-9109-2.
4. Селиверстов Ю.Г. Снежные лавины на равнине. Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. VIII Всероссийская научно-практическая конференция. 8–10 октября 2008 г. Доклады и выступления. СПб., 2009; 149–156. [Seliverstov Yu.G. Snow avalanche on the plain. Problems of Forecasting Emergencies. VIII All-Russian Scientific and Practical Conference. October 8–10, 2008. Reports and Speeches. Sankt-Petersburg, 2009; 149–156. (In Russ.).]
5. Боброва Д.А. Оценка лавинной опасности на равнинных территориях о.Сахалин. Дисс. ... канд. геогр. н. Южно-Сахалинск, 2014. [Bobrova D.A. Assessment of avalanche danger in the flat areas of Sakhalin Island. Diss. ... kand. geogr. sc. Yuzhno-Sakhalinsk, 2014.
6. Höller P. Avalanches in mountain forests and possible effects on hazard zoning in Austria. *Data of Glaciological Studies*. 2002; 93: 100–103.
7. Битюков Н.А. Снежный покров и снежные лавины сочинского Причерноморья. Географические исследования Краснодарского края. Ред. А.В.Погорелов. Краснодар, 2009; 106–116. [Bityukov N.A. Snow cover and avalanches of the Sochi coast of the Black Sea. Geographical Studies of the Krasnodar Territory. Pogorelov A.V. (ed.). Krasnodar, 2009; 106–116. (In Russ.).]
8. Handbook of Snow: Principles, Processes, Management and Use. Gray D.M., Male D.H. (eds). Toronto, 1981.
9. Avalanche classification. *Hydrological Science Bulletin*. 1973; 18(4): 391–402.
10. Казаков Н.А. О формировании снежных лавин в лесу. Материалы гляциологических исследований. 2007; 102: 192–196. [Kazakov N.A. On the formation of avalanches in the forest. *Data of Glaciological Studies*. 2007; 102: 192–196. (In Russ.).]
11. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации. Ред. С.К.Шойгу. М., 2005. [Atlas of Natural and Technological Hazards and Risks of Emergencies in the Russian Federation. Shoigu S.K. (ed.). Moscow, 2005. (In Russ.).]
12. Гляциологический словарь. Ред. В.М.Котляков. Л., 1984. [Glaciological Dictionary. Kotlyakov V.M. (ed.). Leningrad, 1984. (In Russ.).]
13. Bocchiola D., Galizzi M., Bombelli G.M., Sonciniet A. Mapping snow avalanches hazard in poorly monitored areas. The case of Rigopiano avalanche, Apennines of Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. DOI.org/10.5194/nhess-2018-358.
14. Кадастр лавин СССР. Дальний Восток, Сахалин и Курильские острова. Ред. Л.А.Канаев. Л., 1980; 18(4). [Cadastre of avalanches of the USSR. The Far East, Sakhalin and the Kuril Islands. Kanaev L.A. (ed.). Leningrad, 1980; 18(4). (In Russ.).]
15. Кадастр лавин СССР. Дальний Восток, Сахалин и Курильские острова. Ред. Л.А.Канаев. Л., 1986; 18(4). [Cadastre of avalanches of the USSR. The Far East, Sakhalin and the Kuril Islands. Kanaev L.A. (ed.). Leningrad, 1986; 18(4). (In Russ.).]
16. Каталог лавин о.Сахалин и Курильских островов за период 1935–1989 гг. Южно-Сахалинск, 1990. Препринт. [Avalanche Catalog of the Sakhalin and the Kuril Islands for the Period 1935–1989. Yuzhno-Sakhalinsk, 1990. Preprint. (In Russ.).]
17. Лавиноопасные районы Советского Союза. М., 1970. [Avalanche-Prone Areas of the Soviet Union. Moscow, 1970. (In Russ.).]
18. Лосев К.С. По следам лавин. Л., 1983. [Losev K.S. The Tracks of Avalanches. Leningrad, 1983. (In Russ.).]

19. Селиверстов Ю.Г., Сергеева К.И., Глазовская Т.Г., Франкенфилд Дж. География лавинных катастроф. Труды III Международной конференции «Лавины и смежные вопросы». Кировск, 2007; 207–212. [Seliverstov Yu.G., Sergeeva K.I., Glazovskaya T.G., Frankenfield J. Geography of avalanche catastrophes. Proceedings of the III International Conference “Avalanches and Related Subjects”. Kirovsk, 2007; 207–212.]
20. Селиверстов Ю.Г. К вопросу об изменении лавинной активности и риска на территории России. Труды IV Международной конференции «Лавины и смежные вопросы». Кировск, 2011; 75. [Seliverstov Yu.G. On the issue of changes in avalanche activity and risk in Russia. Proceedings of the IV International Conference “Avalanches and Related Subjects”. Kirovsk, 2011; 75. (In Russ.)]
21. Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В., Казакова Е.Н. Большие лавины небольших склонов. Геориск. 2008; 2: 56–58. [Kazakov N.A., Gensiorovskiy Yu.V., Kazakova E.N. Large avalanches on small slopes. Georisk. 2008; 2: 56–58. (In Russ.)]
22. Селиверстов Ю.Г. Катастрофические и особо крупные лавины. Снежные лавины России. Available at: [www.geogr.msu.ru/avalanche/avalanches/kat.doc/kat.htm](http://www.geogr.msu.ru/avalanche/avalanches/kat.doc/kat.htm). [Seliverstov Yu.G. Catastrophic and especially large avalanches. Russian Avalanches. (In Russ.)]
23. Боброва Д.А. Построение карты природных лавинных комплексов для равнинных территорий (на примере острова Сахалин). Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2017; 4: 141–146. [Bobrova D.A. The mapping of natural avalanche complexes for plains (on the example of the Sakhalin Island). Vestnik of the Far East Branch of RAS. 2017; 4: 141–146. (In Russ.)]
24. Казакова Е.Н., Боброва Д.А. Антропогенные и природно-антропогенные лавинные комплексы (на примере о. Сахалин). Геориск. 2015; 4: 18–21. [Kazakova E.N., Bobrova D.A. Anthropogenic and natural-anthropogenic avalanche complex (Sakhalin Island). Georisk. 2015; 4: 18–21. (In Russ.)]
25. Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения Л., 1987. [Bozhinsky A.N., Losev K.S. Fundamentals of Avalanche Studies. Leningrad, 1987. (In Russ.)]
26. Власов В.П., Ханбеков И.И., Чуенков В.С. Лес и снежные лавины. М., 1980. [Vlasov V.P., Khanbekov I.I., Chuenkov V.S. Forest and Avalanches. Moscow, 1980. (In Russ.)]
27. Володичева Н.А. Кедровый стланик – индикатор лавинной деятельности в горах Станового нагорья. Фитоиндикационные методы в гляциологии. М., 1971; 124–133. [Volodicheva N.A. Pinus pumila – an indicator of avalanche activity in the mountains of Stanovoi Highland. Phytoindication Methods in Glaciology. Moscow, 1971; 124–133. (In Russ.)]
28. Древилло М.С. Структура снежного покрова о.Сахалин (подзона средней светлохвойной тайги). Труды Гидрометцентра Сахалинского УГМС. Региональные исследования. Южно-Сахалинск, 1988; 124–127. [Drevilo M.S. The structure of snow cover of the Sakhalin Island (subzone of the middle light-coniferous taiga). Works of the Hydrometeorological Center of the Sakhalin UGMS. Regional Studies. Yuzhno-Sakhalinsk, 1988; 124–127. (In Russ.)]

## Dangerous «Non-Avalanche» Slopes

D.A.Bobrova<sup>1</sup>, E.N.Kazakova<sup>1</sup>, N.A.Kazakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Design Bureau for Marine Research Automation Tools, Far-East Branch of RAS (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)

This article is devoted to a problem of avalanches on the slopes, which are usually considered to be non-avalanche dangerous. We consider sporadic avalanches; avalanches on low slopes; avalanches in the forest; avalanches coming down from only partially snow-covered slopes. Such avalanches regularly cause economic damage and people deaths as a result of their underreporting in assessment of the avalanche danger of the territory. Numerous cases of avalanches on slopes that have been identified as non-avalanche-prone show that the only correct solution to avalanche safety is to define any slope with a relative height of more than 5 m at slopes of 25–50° as potentially avalanche-prone, regardless of the frequency of avalanches on that slope and the presents of a forest on it.

**Keywords:** avalanche danger, sporadic avalanches, avalanches on low slopes, avalanches in the forest.

# Фитоценозы Азовского моря и климатические изменения

В.Г.Ильичев<sup>1</sup>, Л.В.Дашкевич<sup>1</sup>, В.В.Кулыгин<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону, Россия)



Предложена эколого-эволюционная модель роста водорослей Азовского моря, которая содержит механизмы адаптации к температурному и гидрохимическому режиму водоема. Модель имеет небольшую размерность и позволяет проводить компьютерные расчеты на долгосрочную перспективу за приемлемое машинное время. Проведено модельное тестирование механизмов адаптации. Так, в процессе приспособления к биогенному режиму среды реализуется принцип Ле Шателье—Брауна: при повышении концентрации азота (или фосфора) в воде фитопланктонное сообщество перестраивает свою структуру, чтобы увеличить его потребление. А когда температура водоема изменяется синусоидальным образом, температурные параметры оптимального роста водорослей стремятся к экстремальным значениям (минимумам или максимумам) температурной кривой. Обсуждаются актуальные сценарии потепления на 100 и более лет и их влияние на фитоценозы Таганрогского залива и открытой части Азовского моря. Обнаружено, что у теплолюбивых водорослей повышается среднегодовая биомасса и медленно увеличиваются физиологические параметры роста. У холодолюбивых изменение биомассы и параметров оказывается немонотонным. Сделана попытка объяснить это явление.

**Ключевые слова:** математическая модель, Азовское море, водоросли, температура воды, механизмы адаптации.



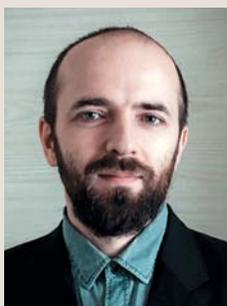
Азовское море.  
Фото С.А.Мисирова



**Виталий Григорьевич Ильичев**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра Южный научный центр РАН. Область научных интересов — моделирование динамики и эволюции экосистем.  
e-mail: [vitaly369@yandex.ru](mailto:vitaly369@yandex.ru)



**Людмила Владимировна Дашкевич**, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник того же центра. Специалист в области региональной климатологии, океанологии.  
e-mail: [ldashkev@ssc-ras.ru](mailto:ldashkev@ssc-ras.ru)



**Валерий Валерьевич Кулыгин**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник того же центра. Специалист в области разработки геоинформационных систем и баз данных, математического моделирования экосистем, анализа риска опасных природных явлений.  
e-mail: [kulygin@ssc-ras.ru](mailto:kulygin@ssc-ras.ru)

*Естественный отбор никогда не спит.*

Московский фольклор

**В**озможные изменения климата порождают проблему прогнозирования его последствий для экологических систем. При этом для получения адекватных результатов прогноз должен слабо зависеть от погрешностей при задании начального состояния экосистемы. Традиционно используются идеи асимптотического компьютерного анализа, когда модельные расчеты проводятся на длитель-

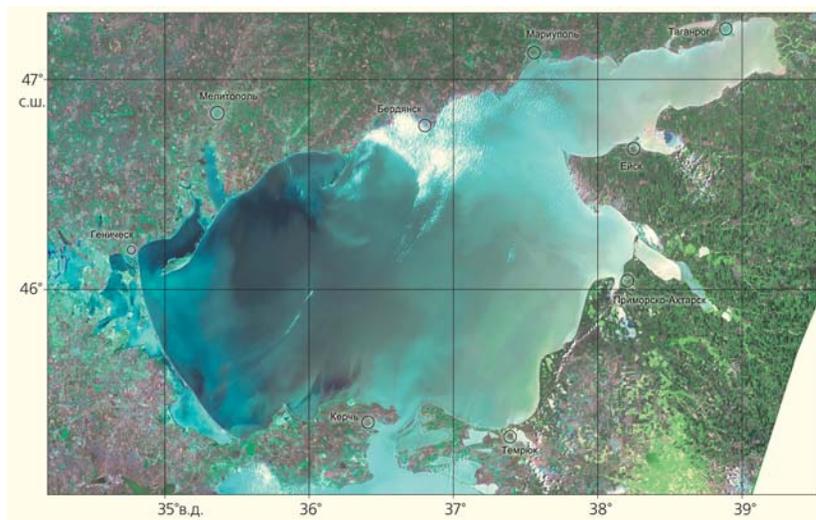


Рис.1. Азовское море. Вид из космоса.

<http://planet.iitp.ru/index1.html>

ную многолетнюю перспективу с ежегодным повторением режима внешних факторов (температуры, количества осадков, величины речного стока и др.). Так выявляются устойчивые тенденции в динамике экосистемы [1, 2]. Сложность заключается в том, что биологические элементы экосистемы (популяции) эволюционируют. Значит, имеет место не только изменение переменных (численностей), но и деформация экологических параметров популяций. Без учета этого обстоятельства прогноз будет выдавать заниженные оценки биологической продуктивности.

Традиционный подход основан на построении эколого-эволюционных моделей, где «прямолинейно» соединены экологические и генетические процессы [3, 4]. Предполагается, что любая популяция состоит из ряда субпопуляций, каждая из которых имеет свои экологические параметры. В результате внутривидовой конкуренции большая часть субпопуляций погибает, а оставшиеся (одна или несколько) становятся носителями «оптимальных» параметров.

Несколько другой подход в 1982 г. предложил английский эволюционный биолог и генетик Д.Мейнард Смит, известный тем, что развивал теорию игр и применял ее к теории эволюции [5]. Он считал, что в процессе адаптации происходит поиск так называемых эволюционно устойчивых параметров (*ЭУ-параметров*). Такое предположение ученый сделал на основе теоретико-игровых соображений о выборе оптимальной *стохастической* стратегии поведения. Этот удачный термин может быть применен и в *детерминированной* ситуации — для описания устойчивости исходной популяции по отношению к субпопуляциям: носителем ЭУ-параметра всегда будет конкурентоспособная популяция.

Основной недостаток традиционного подхода — необходимость задания в модели большого числа субпопуляций (1000 и более) на каждом трофическом уровне. А такая многомерность существенно замедляет компьютерные расчеты на эволюционно значимые времена. Противоречие между требованиями биологической адекватности и скоростью вычислений представлялось непреодолимым. Но эта проблема была решена с изобретением новой модельной конструкции «Адаптация», в которой происходит одновременное изменение переменных и параметров. Она имитирует эволюционный процесс

в малом, имеет небольшую размерность и поэтому обладает высоким быстродействием.

Цель статьи — продемонстрировать возможности «Адаптации». В качестве примера ее практического применения проанализируем, как изменяется динамика и микроэволюция фитоценозов Азовского моря в случае потепления климата (рис.1).

Рассмотрим три основных группы водорослей: диатомовые (Bacillariophyta), пиррофитовые (Pyrrophyta) и синезеленые (Cyanophyta) [6]. Все они имеют различные оптимальные экологические параметры для жизни и развития. Диатомовые водоросли считаются холодолюбивыми, а синезеленые и пиррофитовые — теплолюбивыми (табл.1).

Всякий фитоценоз характеризуется видовым составом водорослей, а водная среда — набором различных биогенных элементов (для простоты ограничимся лишь азотом N и фосфором P). Минеральные соединения данных веществ потребляются водорослями, которые размножаются и частично отмирают, превращаясь в органические соединения. В результате их распада минеральные вещества N и P возвращаются в водную толщу. В модели представлены два фитоценоза: Таганрогского залива (ТЗ) и собственно Азовского моря (СМ). В первом присутствуют только диатомовые и синезеленые,

Таблица 1  
Экологические характеристики водорослей Азовского моря [7]

Группа	θ, °С	Содержание в клетках N и P, в долях к сырому весу	
		K <sub>N</sub>	K <sub>P</sub>
Диатомовые	12–14*	0.00525	0.00105
Пиррофитовые	19–22	0.00750	0.00112
Синезеленые	22–24	0.01050	0.00120

\* Известны и более холодолюбивые азовские диатомовые водоросли.

во втором — диатомовые и пиропитовые водоросли [7] (рис.2). Температура среды задавалась с суточным шагом на основе среднелетних наблюдений [8] или прогнозируемых значений.

**Механизмы адаптации водорослей в математических моделях**

Важную роль в многолетней динамике фитоценозов играют процессы адаптации и микроэволюции водорослей. Перечислим основные из них.

1. При наступлении неблагоприятных температурных условий активные клетки водорослей переходят в пассивное состояние (споры, цисты), в котором существенно затормаживаются все физиологические процессы. При возвращении оптимальных температур происходит обратный процесс [9].

2. В рамках одной популяции сосуществуют различные субпопуляции, в питании предпочитающие «свое» соотношение азот/фосфор в водной среде [10]. Согласно принципу Ле Шателье—Брауна, фитоценоз перестраивает свою структуру так, чтобы увеличить потребление биогенного соединения, которое находится в относительном избытке. Для реализации этого явления с помощью модельной конструкции «Адаптация» достаточно задать в модели три субпопуляции с разным содержанием азота и фосфора в клетках водорослей ( $k_N$  и  $k_P$  соответственно).

В первой, «стандартной», субпопуляции значения данных параметров соответствуют общепринятым. Например, для диатомовых водорослей следует выбрать  $k_N^0 = 0.00525$  и  $k_P^0 = 0.00105$  (см. табл.1).

Во второй, «азотолубивой», субпопуляции выбираем параметры следующим образом:  $k_N^+ > k_N^0$  и  $k_P^- < k_P^0$ .

В третьей, «фосфоролубивой», субпопуляции устанавливаем  $k_N^- < k_N^0$  и  $k_P^+ > k_P^0$ .

В специальной модели конкуренции выполняется основное свойство: если в водной среде отношение N/P велико, то доминирует «азотолубивая» субпопуляция. А если N/P мало, то «фосфоролубивая». Далее считаем, что потребление азота и фосфора каждой субпопуляцией пропорционально содержанию этих веществ в клетках водорослей. Поэтому конструкция «Адаптация» автоматически регулирует отношение N/P и не позволяет ему далеко удаляться от величины  $k_N^0/k_P^0$ .

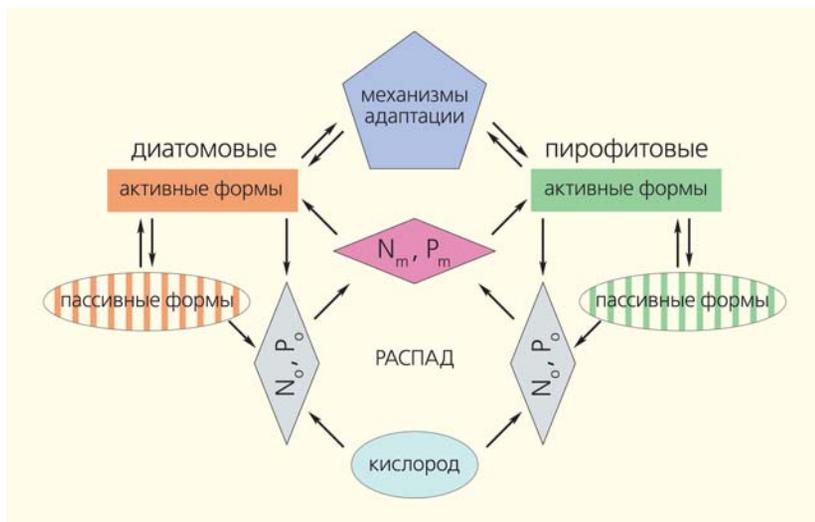


Рис.2. Поток организмов и веществ в фитоценозе СМ.  $N_m$  и  $P_m$  — минеральные формы,  $N_o$  и  $P_o$  — органические формы азота и фосфора.

Подробная математическая формализация соответствующих компьютерных моделей подробно описана в наших прежних работах [7, 11, 12].

3. Каждая группа водорослей имеет свой интервал температурной толерантности  $I = (a - d, a + d)$ , внутри которого происходит рост водорослей. Скорость роста водорослей в зависимости от температуры воды  $\theta$  задается некоторой функцией. Например, следующим симметричным образом:

$$R(\theta) = 3[d^2 - (\theta - a)^2]/d^3 \text{ при } \theta \in I, \text{ иначе } R = 0. \tag{1}$$

Говорят, что  $a$  — оптимальная температура развития,  $d$  — ширина интервала  $I$  (для конкретной группы водорослей). График функции  $R(\theta)$  представляет собой «колокольчик» (рис.3). В формуле (1) воплощена идея Пианки [13]: для эволюционно зрелых популяций площадь под графиком  $R$  не изменяется при вариации параметров  $a$  и  $d$ . Отметим, что иногда используются и «несимметричные» функции для описания роста водорослей [14], но это не дает существенных изменений результата.

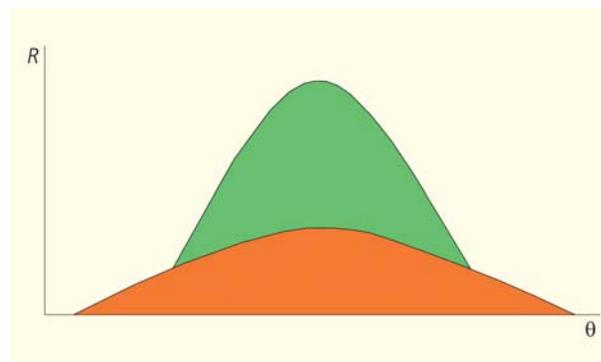


Рис.3. Графики функций роста водорослей при разных параметрах  $d$ .

В дальнейшем ключевую роль играет эволюционная устойчивость параметра. Так, значение  $a_0$  называется ЭУ-параметром, если соответствующая (исходная) популяция не вытесняется в сообществе конкурентов (субпопуляций) с близкими к  $a_0$  значениями параметров. По сути, эволюционная устойчивость — это способность не проигрывать в конкурентной борьбе. Поэтому поиск популяцией ЭУ-параметров имеет прежде всего «оборонительное» значение. Но зачастую здесь реализуется и побочный эффект — увеличение биомассы популяции водорослей.

Разумеется, свойство эволюционной устойчивости может зависеть от количества конкурирующих субпопуляций. Однако если их число достаточно представительно, то результат эволюционного поиска, как правило, однозначен.

Не составляет особого труда модифицировать данное определение эволюционной устойчивости относительно любого набора параметров популяции. При этом очевидно, что в процессе эволюции могут реализоваться только ЭУ-параметры.

Изложим теперь основную идею модельного поиска пары ЭУ-параметров, основанную на методах эволюционного моделирования [15]. Здесь важно отметить, что базовое действие *вытеснения популяции* (достижение некоторой популяцией нулевой численности) требует больших затрат времени на компьютерные вычисления. Поэтому воспользуемся следующим аналогом «вымирания» (принципом Олли [16]):  *$X_0$  вымирает, если ее численность становится меньше критической*. В качестве критического порога можно взять тысячную долю от среднегогодовой биомассы водорослей. Такое допущение существенно ускоряет расчеты.

Далее, пусть  $(a_0, d_0)$  — начальный набор параметров исходной популяции  $X_0$ . Зафиксируем некоторое натуральное число  $m$  — число близких субпопуляций  $\{X_1, \dots, X_m\}$ , каждая ( $i$ -я) из которых имеет свои параметры  $(a_i, d_i)$ . Данные коэффициенты выбираются близкими к исходным, а их значения задаются случайным образом. Например, можно взять четыре субпопуляции со следующи-

ми параметрами:  $(a^-, d_0)$ ,  $(a^+, d_0)$ ,  $(a_0, d^-)$  и  $(a_0, d^+)$ , где  $a^- < a_0 < a^+$  и  $d^- < d_0 < d^+$ .

В результате конкурентного взаимодействия  $\{X_0, X_1, \dots, X_m\}$  для исходной популяции могут возникнуть две ситуации.

1. «Неудачная», когда исходная популяция вымирает. Тогда  $(a_0, d_0)$  заведомо не ЭУ-параметры. Продолжением испытаний становится выбор новых параметров. Если  $X_1$  имеет наибольшую численность среди остальных субпопуляций, то новые параметры исходной популяции образуем следующим образом:

$$(1 - \varepsilon)a_0 + \varepsilon a_1 \text{ и } (1 - \varepsilon)d_0 + \varepsilon d_1, \quad (2)$$

где малый положительный параметр  $\varepsilon$  можно считать скоростью микроэволюции. Фактически формулы (2) означают малый сдвиг исходных параметров в сторону параметров самой сильной субпопуляции. Разумеется, это лишь одно из возможных направлений эволюционного процесса.

2. «Удачная», когда исходная популяция не вымирает. Значит, она может конкурировать с заданным набором субпопуляций. В этом случае генерируем новую группу субпопуляций с параметрами, близкими к исходным, а затем проводим очередное конкурентное испытание. Если таких удачных испытаний накопилось достаточно много, то можно считать исходные коэффициенты роста ЭУ-параметрами.

Обсудим пример для данной модели. Допустим, температура водоема внутри года изменяется по фиксированному синусоидальному закону в пределах от 4 до 24°C. Какие пары  $(a, d)$  тогда будут ЭУ-параметрами?

Для решения этой задачи задаем стартовые значения  $(a, d)$ , а затем под действием модели «Адаптация» начинается медленное изменение параметров. Полученные в результате расчета на многолетний период финальные значения и есть новые ЭУ-параметры. При расчетах были испробованы различные точки старта из области параметров  $AD: 4 \leq a \leq 24$  и  $1 \leq d \leq 11$ , однако финальных пар оказалось совсем немного (рис.4,а).

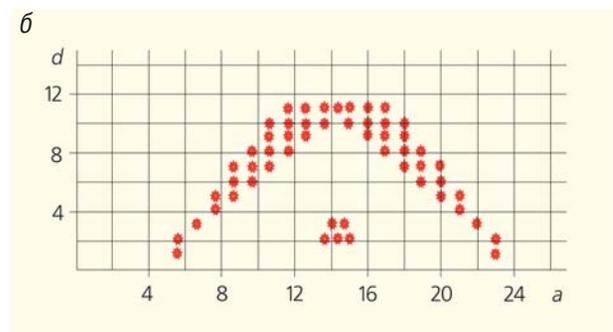
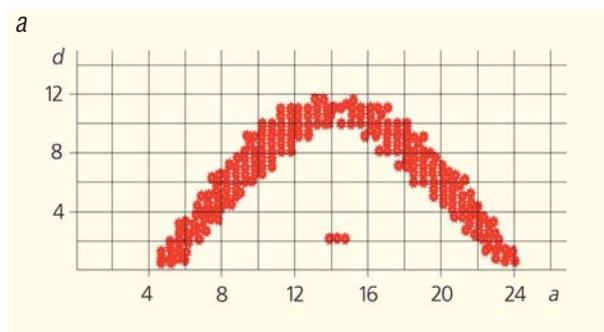


Рис.4. Множество ЭУ-параметров, полученное по модели «Адаптация» (а) и при тестировании конкуренции исходной популяции с субпопуляциями (б).

Полезно протестировать результаты данного поиска. Каждый узел решетки области  $AD$  с шагом 1 задает свою пару  $(a_0, d_0)$  — параметры роста исходной популяции. Следует провести достаточное большое количество испытаний с разными наборами конкурирующих субпопуляций (не менее 100). Если все испытания оказались удачными для исходной популяции, то такая пара параметров объявляется эволюционно устойчивой (рис.4,б).

Хотя два множества на рис.4 построены различным образом (динамика vs статика), они практически совпадают (получается *радуга*). Поскольку классический поиск ЭУ-параметров через конкуренцию и их поиск на основе модельной схемы адаптации дают один и тот же результат, можно говорить об адекватности предложенной быстрой схемы процессам микроэволюции.

С помощью конструкции «Адаптация» выявлено еще одно любопытное обстоятельство. Так, всякая начальная точка — узел решетки  $AD$  — притягивается к своей паре ЭУ-параметров, лежащей на *радуге*. Поэтому каждой паре ЭУ-параметров соответствует свое количество «стартов точек». Какие же точки *радуги* наиболее «притягательны»? Ими оказались две точки: (5, 1) и (23, 1). Естественно, первая пара параметров соответствует холодолюбивым (например, диатомовым), а вторая — теплолюбивым (например, синезеленым и пиррофитовым) водорослям.

Зачастую расположение ЭУ-параметров  $a$  (при фиксированном  $d$ ) можно определить эвристически на основе понятия времени пребывания водорослей в благоприятных условиях. Построим график данной температурной кривой  $\theta(t)$  на периоде, и пусть задан интервал температурной толерантности  $I(a) = [a - d, a + d]$  водоросли. Тогда оценим время пребывания такой популяции в благоприятном диапазоне  $I(a)$ . Время пребывания  $T(a)$  — это сумма длин некоторых временных интервалов (рис.5). Во многих случаях субпопуляция с большим временем  $T(a)$  имеет конкурентное преимущество. А соответствующий параметр  $a$  (и также близкие к нему) претендует на высокое звание ЭУ-параметра.

Установлено, что при малых  $d$  такие существенно большие времена пребывания расположены вблизи точек максимума или минимума температурной кривой  $\theta(t)$  [17]. Это полностью совпадает с предыдущими результатами (см. рис.4).

Пусть задан некоторый годовой температурный режим водной среды, который в дальнейшем многократно повторяется. Тогда для определения ЭУ-параметров роста водорослей  $(a, d)$  можно использовать предыдущую адаптивную схему с одной исходной популяцией и четырьмя близкими субпопуляциями. Однако, используя комментарий к рис.4, можно утверждать, что параметр  $d$  будет достаточно мал.

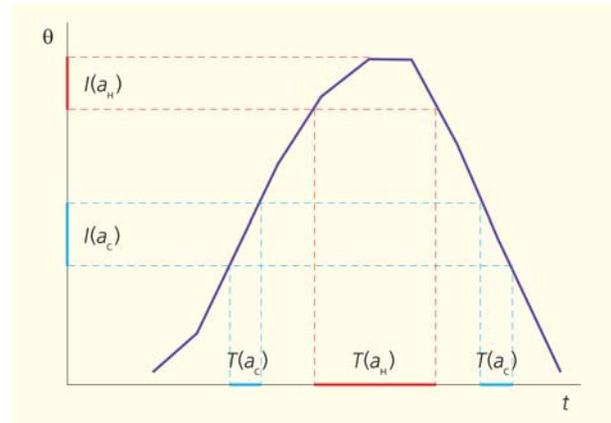


Рис.5. Изменение температуры среды ( $\theta$ ) в течение года и оценка времени пребывания ( $T$ ) в различных интервалах температурной толерантности ( $I$ ) для теплолюбивой (показано красным) и холодолюбивой (показано синим) популяции.

Например, сразу положим  $d = 1$ , и тогда для адаптации параметра  $a$  нужно взять лишь три субпопуляции с различными параметрами  $a^-, a, a^+$ . Это значительно экономит время расчетов.

В свете вышеизложенного для одновременной модельной реализации биогенной и температурной адаптации каждой группы водорослей требуется девять субпопуляций с различными параметрами  $a$  и  $(k_N, k_F)$ .

### Динамика и микроэволюция фитоценоза при потеплении

В статье В.П.Евстигнеева с соавторами [18] на основе 70-летних наблюдений определены тренды изменения температурного режима воздуха (помесячно). С их помощью мы вычислили соответствующие тренды изменения температуры водной среды Азовского моря на период 2010–2110 гг. [12].

Обсудим два актуальных сценария динамики температур (табл.2): «нормальный», когда температура 2010 г. повторяется ежегодно, и «потепление», при котором повторяется гипотетический температурный режим 2110 г.

При потеплении рост температур в середине года (май–ноябрь) будет весьма незначительным (табл.2). Поэтому для получения более полной картины экологических последствий потепления продолжим теоретический прогноз изменения температуры воды на более длительный период: 200, 300, ..., 700 лет с учетом прежних трендов. Оценим состояние фитоценозов на конец каждого периода. Для краткости обозначим через  $E$  количество столетий, рассматриваемых при прогнозе. Так,  $E = 0$  соответствует «нормальному» температурному режиму 2010 г. Далее условно считаем:  $E = 1, 2$  — это «слабое» потепление,  $E = 3, 4$  — «умеренное», а  $E = 5, 6, 7$  — «сильное».

Таблица 2

Температура воды Азовского моря для двух сценариев (Н — нормальный, П — потепление) и двух районов (ТЗ — Таганрогский залив, СМ — море), °С

Сценарий		Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Н	ТЗ	0.55	0.23	3.11	11.97	19.62	24.39	26.80	26.00	18.37	10.68	9.52	3.20
	СМ	2.31	1.40	4.50	11.73	19.09	24.28	27.04	26.75	20.14	12.06	10.51	5.72
П	ТЗ	2.35	1.41	5.61	13.65	20.38	25.24	26.68	26.71	19.51	12.41	9.98	3.71
	СМ	3.63	2.28	6.90	13.35	19.83	25.10	26.93	27.43	21.24	13.74	10.94	6.10

В результате потепления климата увеличивает скорость разложения органических веществ, что ускоряет оборачиваемость азота и фосфора. Поэтому кажется весьма правдоподобной следующая гипотеза: при потеплении среднегодовая биомасса водорослей будет увеличиваться.

На рис.6 представлена рассчитанная динамика биомассы теплолюбивых водорослей (синезеленых и пиррофитовых) и эволюция температур, оптимальных для их роста и развития. Поскольку летом для этих групп водорослей потепление будет незначительным, их температурные параметры также будут возрастать медленно.

Напротив, для более холодолюбивых диатомовых водорослей при потеплении наблюдается не-

монотонная динамика биомасс: изменения существенно зависят от выбора начального значения температурного параметра  $a$ . Заметим, представленные ранее оптимальные температуры развития диатомей (см. табл.1) отражают поведение лишь некоторых видов, например *Leptocylindrus danicus*. У других видов (*Skeletonema costatum*) диапазон оптимальных температур составляет 2–8°С. Поэтому при прогнозировании в каждом модельном фитоценозе мы задавали две субпопуляции диатомовых водорослей: Н (Hot) и С (Cold), начальные температурные параметры которых составляли 12°С и 6°С соответственно. На рис.7 представлены результаты, полученные для района СМ. Похожая ситуация имеет место и для диатомовых водорослей ТЗ.

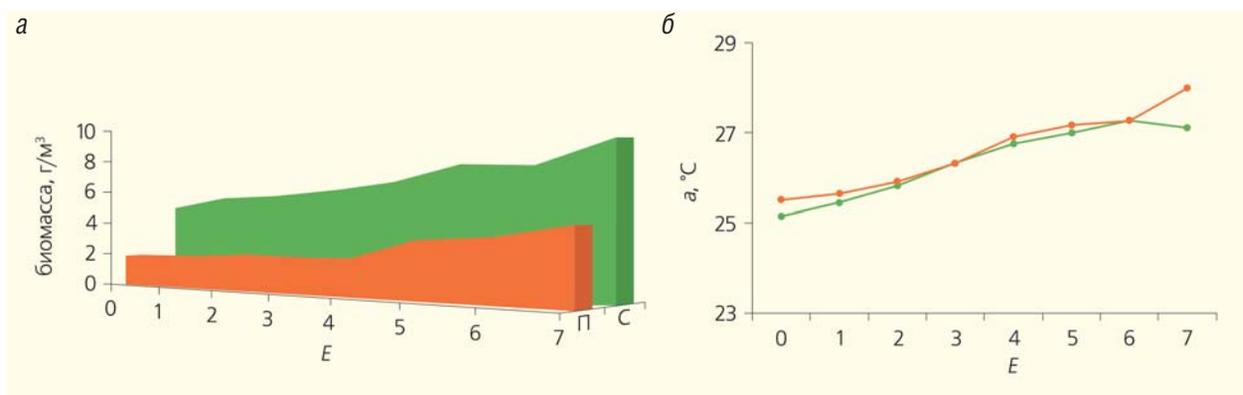


Рис.6. Среднегодовая биомасса (а) и ЭУ-параметры оптимальных температур (б) синезеленых (показано зеленым) и пиррофитовых (показано оранжевым) водорослей при разном уровне потепления.

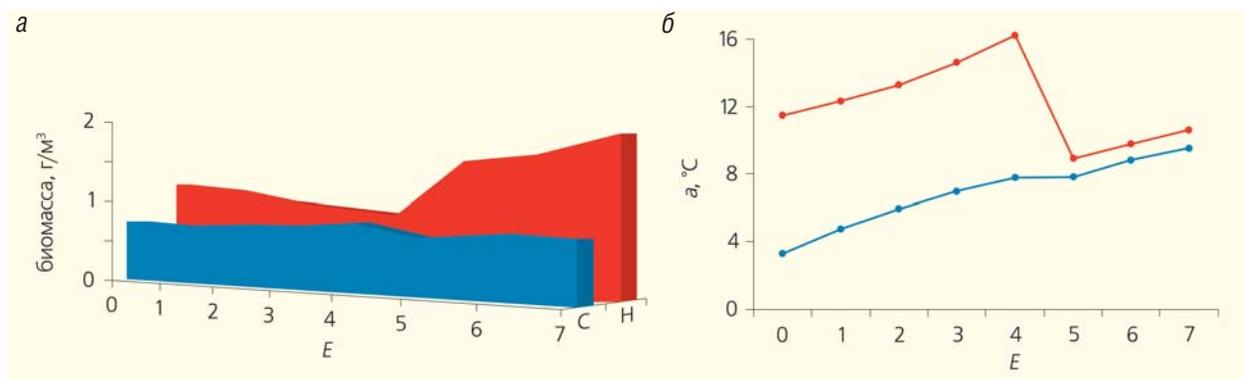


Рис.7. Среднегодовая биомасса (а) и ЭУ-параметры оптимальных температур (б) для диатомовых водорослей (холодолюбивые показаны синим цветом, теплолюбивые — красным) при разных уровнях потепления.

Отметим, что ЭУ-параметр оптимальных температур Н-популяции неожиданно уменьшается на границе умеренного и сильного потепления. После этого и далее температурные параметры Н- и С-популяций становятся совсем близкими.

Объяснить это явление можно на основе понятия времени пребывания  $T(a)$  водорослей в интервале благоприятных температур  $I(a) = [a - 1, a + 1]$  для разных сценариев температурного режима.

При нормальной температуре график  $T(a)$  имеет три существенно высоких «горба»: при  $a = 3, 12$  и  $27$  (см. рис.8,а). Таким образом, первые два параметра близки к оптимальным температурам роста С- и Н-популяций диатомовых водорослей. А последний параметр приближается к значению благоприятной температуры для развития пиррофитовых водорослей.

При наступлении периода потепления наиболее существенные изменения произойдут в зимне-весенний период (см. табл.2). Поэтому, как и следовало ожидать, должны наблюдаться наиболее значительные изменения времен пребывания диатомовых водорослей в разных диапазонах температур. Оказалось, что с ростом параметра  $E$  «горбы» диатомей в основном движутся навстречу друг другу. Это, разумеется, порождает встречное движение ЭУ-параметров Н- и С-популяций диатомовых.

Далее, при  $E = 4$  «горбы» полностью совпадают (см. рис.8,б), а данные параметры оказываются совсем близкими. Поэтому возникают две популяции-близнецы диатомовых с очень похожими биологическими характеристиками. В духе детских рисунков Антуана де Сент-Экзюпери можно сказать: при потеплении двугорбый верблюд превращается в одногорбого.

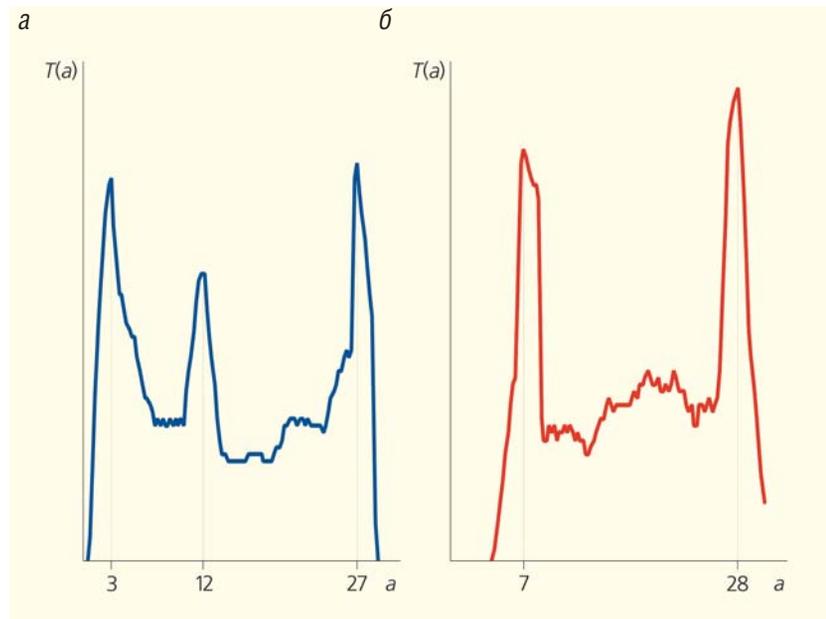


Рис.8. Графики времени пребывания водорослей в благоприятных условиях для различных температурных режимов: а — нормальный для  $E = 0$ ; б — умеренное потепление для  $E = 4$ .

При дальнейшем усилении потепления (рост  $E$  от 4 до 7) «объединенный горб» диатомовых медленно перемещается в сторону более высоких температур. Эти соображения объясняют странную динамику диатомовых водорослей при потеплении.

Отметим, что в летний период температура при потеплении совсем мало изменяется, поэтому «горб» пиррофитовых водорослей практически не движется и никаких неожиданностей с ними не происходит.

Исходя из всего вышеизложенного, можно сказать, что при прогнозировании изменений в экосистемах на долгосрочную перспективу нужно обязательно учитывать эволюционные процессы в фитоценозах\*.

\* Для возможных критиков приведем оптимистическое высказывание М.И.Монастырского: «Великая истина — это такая истина, отрицание которой также великая истина» [19].

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН №АААА-А18-118122790121-5 и ПФИ Президиума РАН №20 (проект №АААА-А18-118011990300-9).

## Литература / References

1. Ворович И.И., Горелов А.С., Горстко А.Б. и др. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря. Математические модели. М, 1981. [Vorovich I.I., Gorelov A.S., Gorsto A.B. et al. Rational Use of Water Resources of the Azov Sea Basin. Mathematical Models. Moscow, 1981. (In Russ.).]
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М., 1981. [Moiseev N.N. Mathematical Problems of System Analysis. Moscow, 1981. (In Russ.).]
3. Абросов Н.С., Боголюбов А.Г. Экологические и генетические закономерности сосуществования и коэволюции видов. Новосибирск, 1988. [Abrosova N.S., Bogolyubov A.G. Ecological and Genetic Regularities of the Coexistence and Coevolution of Different Species. Novosibirsk, 1988. (In Russ.).]

4. *Свирижев Ю.М., Пасеков В.П.* Основы математической генетики. М., 1982. [Svirizhev Yu.M., Pasekov V.P. Foundations of Mathematical Genetics. Moscow, 1982. (In Russ.).]
5. *Maynard Smith J.* Evolution and the Theory of Games. N.Y., 1982.
6. *Студеникина Е.И., Алдакимова А.Я., Губина Г.С.* Фитопланктон Азовского моря в условиях антропогенных воздействий. Ростов-на-Дону, 1999. [Studenikina E.I., Aldakimova A.Ya., Gubina G.S. Phytoplankton of the Sea of Azov in the Conditions of Anthropogenic Impacts. Rostov-na-Donu, 1999. (In Russ.).]
7. *Ильичев В.Г.* Устойчивость, адаптация и управление в экологических системах. М., 2009. [Ilichev V.G. Stability, Adaptation and Control in Ecological Systems. Moscow, 2009. (In Russ.).]
8. *Matishov G., Matishov D., Gargopa Yu. et al.* Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. Matishov G., Levitus S. (eds). Washington, D.C., 2008.
9. *Ушатинская Р.С.* Скрытая жизнь и анабиоз. М., 1990. [Ushatinskaya R.S. Hidden Life and Anabiosis. Moscow, 1990. (In Russ.).]
10. *Фурсова П.В., Левич А.П.* Математическое моделирование в экологии сообществ. Проблемы окружающей среды. Обзор ВИНТИ. М., 2002; 9. [Fursova P.V., Levich A.P. Mathematical modeling of ecological communities. Environmental Problems. VINITI Survey Information. Moscow, 2002; 9. (In Russ.).]
11. *Ильичев В.Г., Дашкевич Л.В.* Гидрохимический режим Азовского моря: компьютерные эксперименты. Природа. 2015; 12: 18–22. [Ilichev V.G., Dashkevich L.V. Hydrochemical regime of Azov Sea: computer experiments. Priroda. 2015; 12: 18–22. (In Russ.).]
12. *Ильичев В.Г., Кулыгин В.В., Дашкевич Л.В.* Потепление и возможные изменения в фитоценозах Азовского моря. Фундаментальная и прикладная климатология. 2017; 4: 28–41. [Ilichev V.G., Kulygin V.V., Dashkevich L.V. Warming and potential changes in phytocenoses of the Sea of Azov. Fundamental and Applied Climatology. 2017; 4: 28–41. (In Russ.).]
13. *Пианка Э.* Эволюционная экология. М., 1983. [Pianka E. Evolutionary Ecology. Moscow, 1983. (In Russ.).]
14. *Сергеев Ю.Н., Савчук О.П., Кулеш В.П. и др.* Математическое моделирование морских экологических систем. Л., 1977. [Sergeev Yu.N., Savchuk O.P., Kulesh V.P. et al. Mathematical modeling of marine ecological systems. Leningrad, 1977. (In Russ.).]
15. *Фогель Л., Оуэнс А., Уолш М.* Искусственный интеллект и эволюционное моделирование. М., 1969. [Fogel' L., Owens A., Walsh M. Artificial Intellect through Simulated Evolution. Moscow, 1969. (In Russ.).]
16. *Allee W.C., Emerson A.E., Park O. et al.* Principles of Animal Ecology. Philadelphia, 1949.
17. *Матишов Г.Г., Ильичев В.Г., Семин В.Л., Кулыгин В.В.* Об адаптации популяций к температурному режиму среды. Результаты компьютерных экспериментов. Доклады Академии наук. 2008; 420(2): 282–285. [Matishov G.G., Ilichev V.G., Semin V.L., Kulygin V.V. Adaptation of populations to temperature conditions: Results of computer simulation. Doklady Biological Sciences. 2008; 420(1): 183–186.]
18. *Евстигнеев В.П., Наумова В.А., Евстигнеев М.П. и др.* Физико-географические факторы сезонного распределения линейных трендов температуры воздуха на Азово-Черноморском побережье. Метеорология и гидрология. 2016; 1: 29–40. [Evstigneev V.P., Naumova V.A., Evstigneev M.P., Lemeshko N.A. Physiographic factors of seasonal distribution of linear trends in air temperature on the Azov-Black sea coast. Russian Meteorology and Hydrology. 2016; 41(1): 19–27.]
19. *Монастырский М.И.* Бернхард Риман. Топология. Физика. М., 1999. [Monastyrsky M.I. Bernhard Riemann. Topology. Physics. Moscow, 1999. (In Russ.).]

## Azov Sea Phytocenoses and Climate Changes

V.G.Ilichev<sup>1</sup>, L.V.Dashkevich<sup>1</sup>, V.V.Kulygin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center The Southern Scientific Centre of RAS (Rostov-on-Don, Russia)

An ecological-evolutionary model of algae growth in the Sea of Azov, which contains adaptation mechanisms to the water temperature and hydrochemical regime, is proposed. The model has a small dimension and allows to make simulations for an acceptable machine time. Specified adaptation mechanisms have been tested. During adaption to the nutrient regime, the Le Chatelier—Brown principle is realized: with an increase of nitrogen (or phosphorus) concentration in water, the phytoplankton community structure is changed in order to increase the consumption of this element. The changes of the water temperature in a sinusoidal manner, lead to the convergence of the temperature parameters of optimal algae growth to extreme values (minima or maxima) of the temperature curve. Long-term warming scenarios (100 years and more) and their impact on the phytocenoses of the Taganrog Bay and the open part of the Sea of Azov are discussed. It has been found that average annual biomass of thermophilic algae (Cyanophyta, Pyrrophyta) is increase. Also, there is a slow increase of the growth parameters of these algae. For cold-loving algae (Bacillariophyta), the change of biomass and physiological parameters are non-monotonic. An explanation of this phenomenon has been proposed.

**Keywords:** mathematical model, Sea of Azov, algae, water temperature, adaptation mechanisms.

# Глубоководные склерактиниевые кораллы — обитатели гайотов

кандидаты геолого-минералогических наук Н.Б.Келлер<sup>1</sup>, Ю.А.Зарайская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии имени П.П.Ширшова РАН (Москва, Россия)

<sup>2</sup>Геологический институт РАН (Москва, Россия)

e-mail: keller@ocean.ru; zarajka85@gmail.com

В океане существуют необычные одиночные горы с плоскими вершинами — гайоты. Относительно их происхождения мнение геологов едино — это вулканические горы, погружившиеся со временем ниже уровня океана. В экспедициях Института океанологии имени П.П.Ширшова РАН на многих гайотах собраны коллекции глубоководных кораллов. В нашем исследовании мы попытались сравнить различные виды этих кораллов с гайотами из разных частей океанов, что дало нам возможность высказать предположение о возрасте гайотов и скорости их опускания.

**Ключевые слова:** глубоководные кораллы, океан, гайоты, возраст, скорость опускания.

**Н**а картах рельефа дна океанов отчетливо видны возвышающиеся над дном одиночные подводные горы. Эти колоссальные конусообразные сооружения, особенно густо усеивающие Тихий океан в его центральной части, будят воображение и наводят на размышления. Высота таких гор достигает 4–5 км. Их подножия расположены на абиссальных глубинах, а столообразные вершины часто находятся всего лишь в 200–300 м от водной поверхности. Плоские вершины выглядят необычными, поскольку подводным горам свойственна конусообразная форма. На данное обстоятельство геологи и геоморфологи обратили внимание уже давно. Американский геолог Г.Х.Хесс (1906–1969) предложил новый термин для названия подобных подводных гор — гайот (guot) — в честь французского географа Арнольда Гийо.

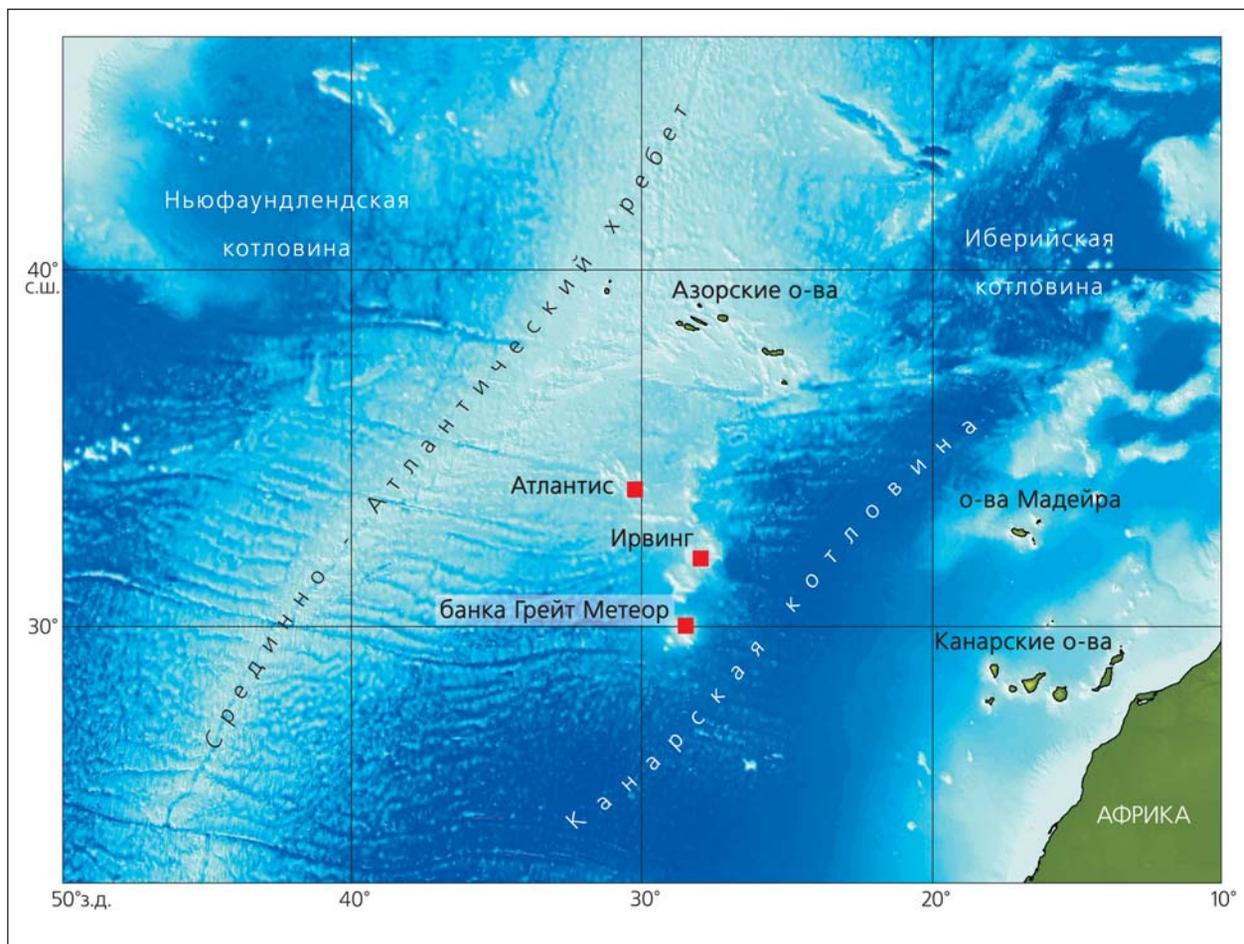
Со времен Чарльза Дарвина утвердилось мнение, что гайоты представляют собой погружившиеся атоллы или мелководные банки, которые возникли на вершинах подводных вулканических гор. О мелководном прошлом гайотов свидетельствует присутствие в карбонатных осадках на их вершинах и верхних склонах ископаемых остатков известковых водорослей, рифообразующих кораллов и рудистов (вымершей группы двустворчатых моллюсков), характерных для населения древних коралловых рифов. Типичный рифовый биоценоз не опускается глубже 50 м. При погружении атоллов ниже фотической зоны такие кораллы погибают. Поскольку на вершинах гайотов обычно присутствуют рифовые известняки, имеющие меловой и эоце-

новый возраст, приходится признать, что опускание вершинных атоллов гайотов в глубины океана происходило по крайней мере с конца эоцена (56.0–33.9 млн лет назад) [1, 2].

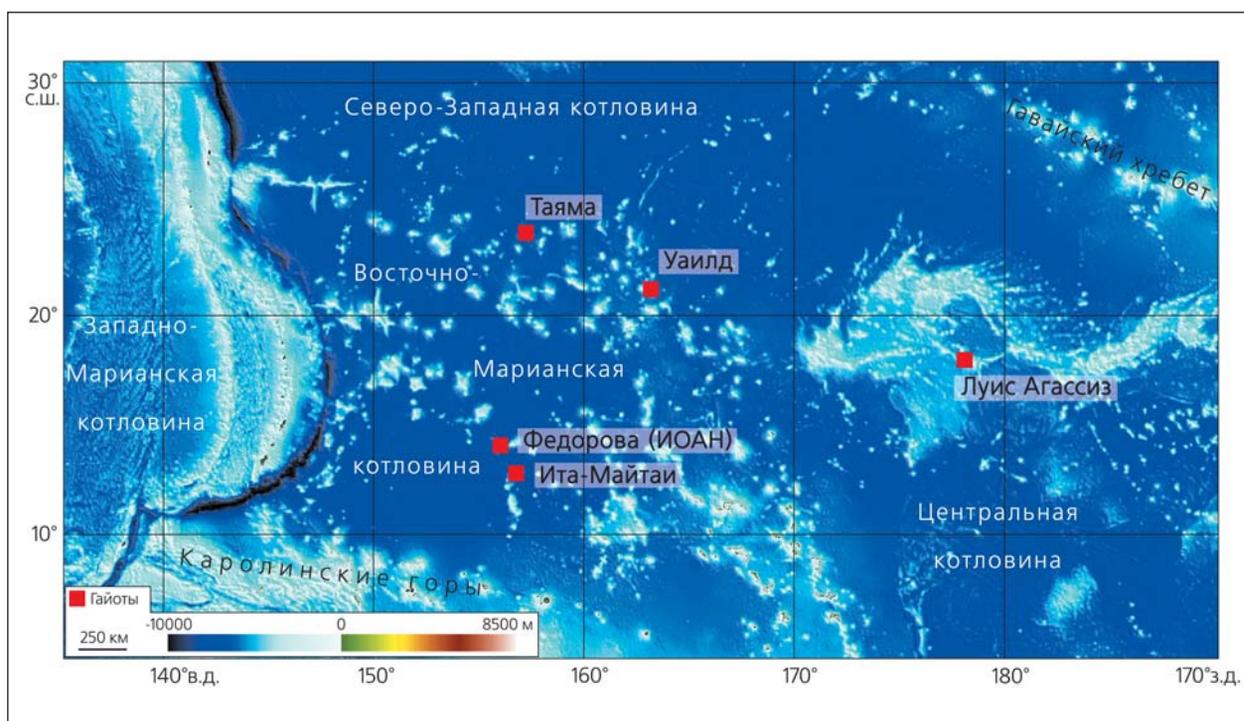
Мелководные рифообразующие склерактиниевые кораллы и их отложения, которые сформировались на вершинах гайотов, изучаются тектонистами для определения скорости погружения таких гор. Но не только древние вымершие коралловые рифы находят на вершинах гайотов [3]. Кроме кораллов, образующих рифы, здесь поселяются и другие, глубоководные, лишенные зооксантелл (микроскопических одноклеточных водорослей — симбионтов кораллов). Ранее они не привлекали особого внимания при изучении гайотов. Эти полипы также обладают известковым скелетом, однако, в отличие от мелководных, живут в большом диапазоне глубин (от нескольких десятков метров до более чем 6 км) и температур (от 20° до –1.1°C). Нам показалось интересным выяснить, можно ли при внимательном анализе глубоководного кораллового населения сравнить относительное время погружения гайотов в разных районах Тихого и Атлантического океанов.

Следует подчеркнуть, что данных о холодно-водных кораллах, которые обитают на гайотах, очень мало. Главным образом они получены со станций, отработанных в экспедициях Института океанологии имени П.П.Ширшова РАН.

Не строящие рифов глубоководные склерактиниевые кораллы появляются лишь в средней юре. К позднему мелу они уже прочно закрепились в ча-



Карта рельефа дна северной части Атлантического океана. Здесь и на следующей карте батиметрическая основа — цифровая модель рельефа GEBCO\_2014 [4].

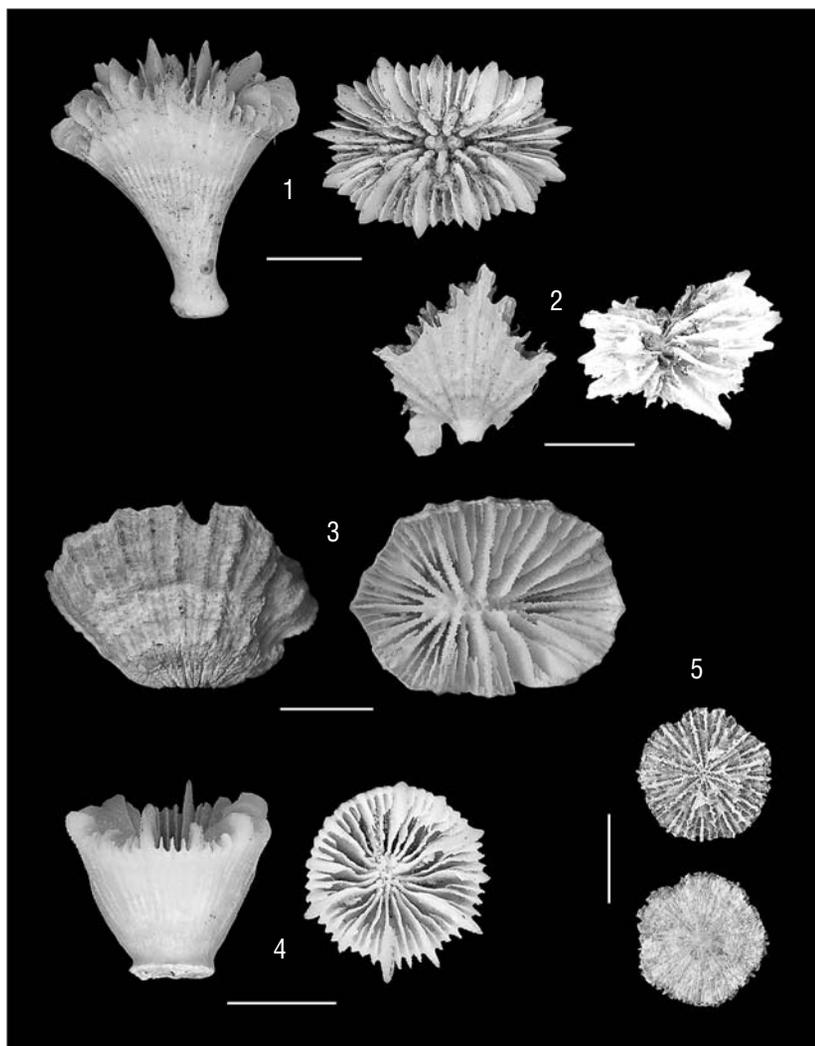


Карта рельефа дна центральной части Тихого океана.

сти литорали, на шельфе и в батальных областях и к концу мела приобрели современный облик. Наиболее мощное их развитие падает на конец третичного времени, и на сегодняшний день в Мировом океане существует более 1000 их видов. Значительная часть широко распространенных в океане родов склерактиний появилась в палеогене (66.00–23.03 млн лет назад) [5]. Однако возраст возникновения многих их видов, населяющих современный океан, остается неясным. Это объясняется тем, что палеонтология имеет дело исключительно с мелководными склерактиниями, а определить возраст глубоководных кораллов обычными стратиграфическими методами практически невозможно. Именно поэтому для оценки появления некоторых видов мы попытались применить палеоклиматический подход, с использованием данных о температуре вод океана в геологическом прошлом и установленных нами температурных диапазонах существования 53 видов кораллов [6].

**Тихий океан.** Наибольшее количество гайотов воздымается в его центральной части. «Величественная горная система Маркус-Неккер протянулась на тысячи километров в широтном направлении. А в меридиональном направлении океан пересекается с севера на юг связанными друг с другом подводными горными системами, валами и хребтами. И во всех этих горных системах, вне всякого сомнения, на поверхность океана выходили не только нынешние острова, но и затопленные ныне атоллы, гайоты и подводные горы, погруженные на сотни, десятки, а порой и просто на несколько метров», — так писал известный российский океанолог Г.Б.Удинцев [7].

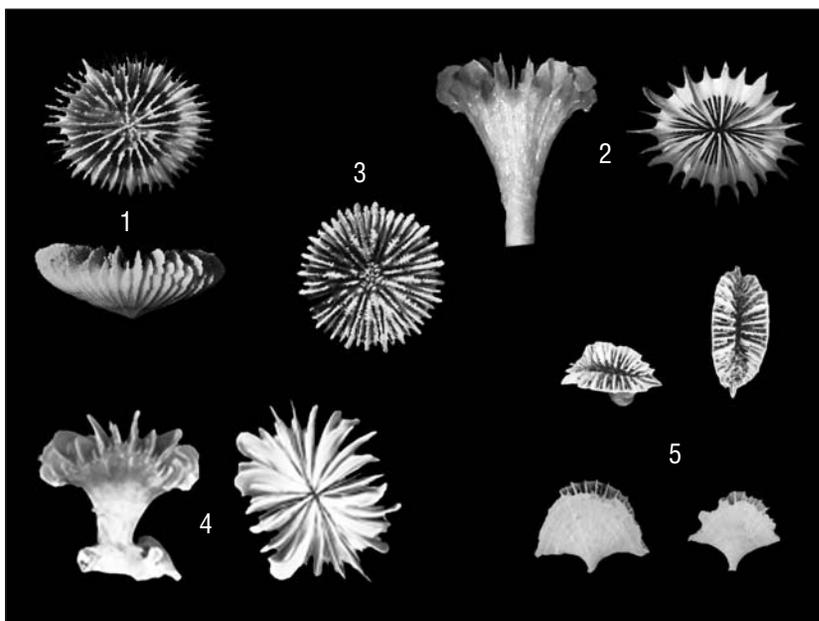
Холодноводные кораллы обнаружены на гайотах Ита-Майтаи и Федорова (гайот ИОАН), входящих в группу Магеллановых гор, и на гайотах Таяма, Уаилд и Луис Агассиз в горной системе Маркус-Неккер, возвышающихся в центральной части Восточно-Марианской котловины, в приэкваториальной области Тихого океана. Основания этих гайотов находятся на глубине, превышающей 6 км, а вершины поднимаются до глубин 1400 м.



Фотографии склерактиниевых кораллов. Тихий океан: 1 — *Caryophyllia pacifica*, 2 — *Flabellum marcus*, 3 — *Flabellum trapezoidum*, 4 — *Vaughanella oreophyla*, 5 — *Fungiacyathus pliciseptus*.

На них среди другой обильной донной фауны обитают холодноводные кораллы семи видов [8].

На вершине гайота Ита-Майтаи на глубине 1490 м обнаружены пятна и луга многочисленных экземпляров склерактиний *Flabellum marcus*, которые образовались в конце палеогена. Примерно с той же глубины подняты полипы *Fungiacyathus pliciseptus*, возникшие в середине палеогена. Поселения полипов этого вида находили на глубине 480 м на подводном хребте Сала-и-Гомес, в юго-восточной части Тихого океана [9]. На верхнем плато гайота Федорова, на глубине 1860 м, был обнаружен экземпляр *Peponocyathus australiensis* эоценового возраста. Эти полипы широко распространены в океане лишь на глубинах от 44 до 635 м. Экземпляры вида *Enalopsam miostrata* палеогенового возраста были встречены на глубине более 1000 м. Ниже, на 1400–1600 м, найдены немногочисленные экземпляры видов *Vaughanella oreophyla*, *Caryophyllia pacifica* и *Flabellum trapezoidum*. Это



Фотографии склерактиниевых кораллов. Атлантический океан: 1 — *Deltocyathus eccentricus*, 2 — *Javania cailleti*, 3 — *Deltocyathus moseleyi*, 4 — *Desmophyllum dianthus*, 5 — *Flabellum chunii*.

новые виды склерактиний, и возраст их возникновения пока не определен.

**Атлантический океан.** В нем многочисленные холодноводные кораллы поселяются на подводных горах Грейт Метеор и Ирвинг [10]. На вершине банки Грейт Метеор, на глубине 450 м, склерактинии *Caryophyllia calvery* образуют целые луга. Здесь их поднято около 2500 экземпляров, а с глубины 1140 м — всего пять. Возраст возникновения этого вида — палеогеновый. Не так многочисленны полипы *Javania cailleti* плиоценового (5.33–2.59 млн лет назад) возраста и *Flabellum chunii*. Однако на глубине свыше 600 м полипы *F. chunii* встречаются довольно часто (215 экземпляров) — примерно так же, как и *Deltocyathus moseleyi* (Cairns) (207 экземпляров). Оба вида известны с палеогена. На глубинах 1800–2160 м обитают кораллы *Vaughanella concinna* (10 экземпляров) и *Deltocyathus conicus* (три экземпляра), известные с миоцена (23.03–5.33 млн лет назад).

Итак, большинство современных ученых не сомневаются в том, что гайоты представляют собой древние вулканические острова, погруженные под воды океана. Однако вопросы, с какой скоростью происходит их погружение, где оно происходит быстрее, а где медленнее и как оно связано с рифтовыми активными зонами, издавна волновали тектонистов и остаются до конца не решенными до сих пор [1, 2, 7]. Роль тектонических процессов остается вне нашей компетенции. Но мы попытались подойти к этой проблеме с другой стороны, предполагая, что сопоставление возраста глубоководных кораллов, населяющих гайоты разных областей океана,

и глубины, на которой они встречаются, поможет определить относительные скорости погружения этих подводных гор.

Как мы показали, виды, обитающие на гайотах Атлантического и Тихого океанов, появились в палеогене, причем одни — в начале эпохи, другие — в середине или в конце. Более молодых холодноводных видов на гайотах, на глубине более 2500 м, мы не встречали.

В Атлантическом океане на мелководных вершинах самых мощных гайотов живет до 2500 экземпляров одиночных склерактиний, в то время как на их погруженных склонах — от 2 до 100. На тихоокеанских гайотах видовое разнообразие ниже — один-два вида в пробе (разброс идет от 1 до 20 экземпляров каждого вида).

**Можно ли на основании определенного нами возраста кораллов судить о возрасте гайотов?**

Мы вправе лишь утверждать, что верхняя часть гайотов (глубины выше 2500 м) населена современными видами, возникшими еще в палеогене, но не раньше. Эти выводы совпадают с заключением Ю.А.Богданова и О.Г.Сорохтина, которые обнаружили, что вершинные плато изученных нами тихоокеанских гайотов перекрыты фораминиферовыми илами эоцен-плейстоценового возраста [1, 2].

Несмотря на сравнительную скудость имеющегося в нашем распоряжении материала с гайотов Тихого океана, он оказался весьма любопытным. Два широко распространенных в океане вида коралловых полипов — *Fungiacyathus pliciseptus* и *Peponocyathus australiensis* — населяли верхние плато гайотов на глубинах, намного превышающих известные в мире пределы их вертикального распространения. Вид *F. pliciseptus* на гайоте Ита-Майтаи обитает почти на 1000 м ниже отметки, на которой мы его обнаружили на подводном хребте Сала-и-Гомес [9]. Глубина обитания мелких одиночных склерактиний вида *P. australiensis* на гайоте Федорова также более чем на 1000 м больше обычных пределов его распространения [11]. Эта находка на аномальной глубине, в два раза превышающей зафиксированную ранее, представляется особенно интересной еще и потому, что известен нижний временной интервал существования данного вида — эоцен. Можно предположить, что предки *P. australiensis*, поселившиеся на сравнительно небольших глубинах на вершинном плато гайота Федорова, по мере его погружения вглубь

океана постепенно приспосабливались к все более глубоководным условиям. Полипы этих же видов, по всей вероятности, в силу недавнего погружения хребта Сала-и-Гомес живут там на значительно меньших глубинах.

Таким образом, находки изученных нами видов беззооксантеллятных коралловых полипов на вершинах гайотов Ита-Майтаи на глубинах, значительно превышающих известные ранее границы их батиметрического распределения в Мировом океане, косвенным образом подтверждают постэоценовое время погружения этих гайотов.

Коралловая фауна атлантических гайотов намного разнообразнее и интереснее тихоокеанской,

хотя по возрасту они совпадают. Однако кораллы, населяющие крупные подводные горы Атлантики, живут на традиционных глубинах. Это может свидетельствовать о меньшей скорости опускания местных гайотов, несмотря на то что они расположены — так же, как и тихоокеанские, — в тектонически активной зоне.

Наши первые попытки сопоставить возраст некоторых видов глубоководных склерактиний, поднятых с разных глубин на вершинах и склонах гайотов в центральных частях Тихого и Атлантического океанов, кажутся нам заслуживающими внимания, они дают дополнительные знания об образовании и развитии гайотов. ■

## Литература / References

1. Богданов Ю.А., Сорохтин О.Г., Зоненшайн Л.П. и др. Железомарганцевые корки и конкреции подводных гор Тихого океана. М., 1990. [Bogdanov Yu.A., Sorochtin O.G., Zonenschein L.P. et al. Ferromanganese crusts and concretions of the Pacific deep-sea mountain. Moscow, 1990. (In Russ.)]
2. Сорохтин О.Г., Городницкий А.М. Происхождение плосковершинных подводных гор — гайотов. ДАН СССР. 1982; 263(2): 317–321. [Sorochtin O.G., Gorodnizkiy A.M. The origin of deep-sea mountain with the flat top — guyots. Reports of the academy of sciences USSR. 1982; 263(2): 317–321. (In Russ.)]
3. Мурдмаа И.О. Фации океанов. М., 1987. [Murdmaa I.O. Facies of the oceans. Moscow, 1987. (In Russ.)]
4. Weatherall P., Marks K.M., Jakobsson M. et al. A new digital bathymetric model of the world's oceans. Earth and Space Science. 2015; 2: 331–345. DOI:10.1002/2015EA000107.
5. Vaughan T.W., Wells J.W. Revision of the suborders, families and genera of the *Scleractinia*. Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 1943; 44.
6. Келлер Н.Б., Оськина Н. С., Николаев С.Д. Новый подход к определению возраста глубоководных видов склерактиний на основании температурных диапазонов их обитания. Докл. АН. 2009; 425(2): 218–222. [Keller N.B., Oskina N.S., Nikolaev S.D. New approach to the problem to determine the Age of the Deep-water Species of Scleractinia using the Temperature Ranges of Their Habitation. Doklady Akademii Nauk. 2009; 425(2): 218–222. (In Russ.)]
7. Удинцев Г.Б. Геоморфология и тектоника дна Тихого океана. М., 1972. [Udintsev G.B. Geomorphology and tectonics of the Pacific bottom. Moscow, 1972. (In Russ.)]
8. Келлер Н.Б. Одиночные мадрепоровые кораллы (Madreporaria). Бентос подводной горы Маркус-Неккер и смежных районов Тихого океана. М., 1981; 28–39. [Keller N.B. The solitary Madreporarian corals. Benthos of the submarine Mountains Marcus-Nekker and adjacent Pacific regions. Moscow, 1981; 28–39. (In Russ.)]
9. Келлер Н.Б. Склерактиниевые беззооксантеллятные кораллы подводных гор Наска, Сала-и-Гомес. Бентос высокоширотных районов М., 1998; 89–93. [Keller N.B. Scleractinian Azooxantellate corals of the deep-sea mountain Naska and Sala-i-Gomez. Benthos of the high latitude area. Moscow, 1998; 89–93. (In Russ.)]
10. Келлер Н.Б. Мадрепоровые кораллы Средиземного моря. Труды ИО АН СССР. 1982; 117: 147–150. [Keller N.B. The madreporarian corals of Mediterranean. Trudy IO AN SSSR. 1982; 117: 147–150. (In Russ.)]
11. Cairns S.D. The Marine Fauna of New Zealand: Scleractinia (*Cnidaria: Anthozoa*). New Zealand Oceanograph. Inst. Mem. 1995; 103.

## Guyot Deep-Sea Scleractinian Corals

N.B.Keller<sup>1</sup>, Yu.A.Zarayskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS (Moscow, Russia)

<sup>2</sup>Geological Institute, RAS (Moscow, Russia)

Seamounts are common globally and among them there are many with flat tops, the guyots. Geological scientific groups are unanimous on their origin: they are volcanic mountains that have been submerged below sea level over the course of time. During the expeditions of the Shirshov Institute of Oceanology deep-sea coral have been sampled from multiple guyots in the Northern Atlantic and Central Pacific oceans. Groups of coral species have been compared based on their location and their age have been evaluated. The analysis of the distribution of the coral habitats allows to estimate the rate and submersion speed of the studied corals.

**Keywords:** deep-sea corals, ocean, guyots, submersion speed.

# Волосатики и степени свободы в эволюции белков

кандидат биологических наук А.Ю.Панчин

Институт проблем передачи информации имени А.А.Харкевича (Москва, Россия)

e-mail: alexpanchin@iitp.ru

Противники теории эволюции часто рассуждают о невозможности самопроизвольного появления сложных биологических молекул, о крайне малой вероятности последовательного возникновения достаточно большого количества полезных мутаций. Однако подобные оценки не учитывают естественный отбор и огромное число степеней свободы в эволюции жизни — разных способов получения схожих по функциям молекул. Например, один и тот же белок можно получить, используя разные последовательности ДНК. Нам удалось расширить представления о степенях свободы в эволюции белков в результате прочтения митохондриального генома четырех видов волосатиков (*Nematomorpha*). В нем мы обнаружили необычно длинные и точные повторы нуклеотидов (палиндромы) в белок-кодирующих генах. Функция этих повторов до конца не понятна, но это удивительная ситуация, когда эволюция вынуждена искать компромиссы: с одной стороны, ген должен кодировать функциональный белок, с другой — есть это странное требование, чтобы нуклеотиды образовывали палиндром. И оказывается, что даже в этих условиях возможно сохранение функции сложных и важных белков.

**Ключевые слова:** волосатики, *Nematomorpha*, паразитоидный образ жизни, мтДНК, инвертированные повторы в белок-кодирующих генах, палиндромы, креационизм, эволюция.

Теория эволюции, пожалуй, самая фундаментальная теория в биологии. В базе данных PubMed находятся сотни тысяч научных публикаций, посвященных проблемам эволюции. По результатам опроса Исследовательского центра Пью (Pew Research Center)\*, среди членов Американской ассоциации содействия развитию науки (American Association for the Advancement of Science, AAAS) — крупнейшего сообщества ученых, издающих журнал Science, — уверены в эволюции человека 98% опрошенных (99%, если брать только активно работающих, т.е. получающих гранты исследователей). Вдохновленные идеями Дарвина, специалисты создали метод генетического программирования, который стал стандартным инструментом для новых программ, которые не написаны программистом, а выращены на основе случайных мутаций кода и направленного отбора. Успех таких методов подтверждает верность общих принципов эволюции и их применимость даже за пределами биологических объектов. Несмотря на все сказанное, эволюцию признают только 65% взрослого населения США. В России, по данным опроса Всероссийского цент-

ра изучения общественного мнения\*\*, сторонниками теории эволюции Дарвина считают себя 35% опрошенных (45% среди высокообразованных респондентов), а приверженцами концепции божественного сотворения (креационизма) — 44%.

Среди популярных аргументов в пользу невозможности эволюции без вмешательства некоего разумного создателя — тезис о невероятности самопроизвольного получения тех или иных полимерных биологических молекул, лежащих в основе жизни. Например, на сайте американского Института креационных исследований (Institute for Creation Research) приводится такое рассуждение: «Предположим, что каждая мутация полезна или вредна с вероятностью одна вторая. Элементарная статистическая теория показывает, что вероятность 200 последовательных полезных мутаций —  $0.5^{200}$ , или один шанс на  $10^{60}$ . <...> Предположим, что на каждом из  $10^{14}$  квадратных футов поверхности Земли существует миллиард мутирующих систем и на каждую мутацию требуется всего полсекунды. Каждая система может пройти через 200 мутаций за 100 с и, если ничего не получится, начать заново.

\* An Elaboration of AAAS Scientists' Views. 2015 ([www.pewinternet.org/interactives/public-scientists-opinion-gap](http://www.pewinternet.org/interactives/public-scientists-opinion-gap)).

\*\* Дарвинисты среди нас, или Кто создал человека и был ли Всемирный потоп? Данные опроса ВЦИОМ. 27 ноября 2009 г. (<https://wciom.ru/index.php?id=236&uid=2113>).

<...> Перемножая все эти числа, мы получим, что за время существования Вселенной могло произойти  $10^{39}$  попыток сборки системы из 200 компонентов». Дальше делается вывод, что даже 200-компонентный организм не мог эволюционировать, поскольку  $10^{60}$  на порядки больше, чем  $10^{39}$ .

Забавно, что из подобных утверждений, опровергающих эволюцию, следует, что их авторы не понимают, в чем, собственно, главная идея и заслуга Дарвина. Предложенный им механизм эволюции основан на естественном отборе, фиксирующем те наследуемые особенности, которые способствуют размножению и выживанию. Иными словами, вам не нужно сразу получить готовую сложную систему. Полезные изменения постепенно накапливаются и фиксируются.

Представьте, что вы играете в усложненную версию игры «Поле чудес», где требуется отгадать не слово, а случайную последовательность длиной в 200 букв, составленную из 33 букв нашего алфавита. Всего возможных комбинаций  $33^{200}$ , это примерно  $5 \cdot 10^{303}$ . Угадать такое «слово» целиком невозможно. Но теперь представьте, что все буквы, вставшие на свои места, фиксируются. Уже после первой попытки назвать слово, вероятнее всего, у вас будет шесть отгаданных букв ( $200/33 \sim 6$ ). После второго раунда, видимо, таких букв уже будет двенадцать — и так далее.

Есть замечательная статья математиков Х.Уильфа и В.Эванса [1], где они выводят теорему, из которой следует, что для слова длиной  $L$  и алфавита размером  $K$  букв среднее число раундов угадываний этого слова (при наличии отбора) пропорционально  $K \log L$ , а не  $K^L$ . Более точная формула:  $\log L / \log(K/K - 1)$  плюс малое число, которым можно пренебречь.

Если применить эту формулу к нашему примеру, то всего за 172 раунда слово из 200 букв будет отгадано. В справедливости этих рассуждений легко убедиться на простом примере. Возьмите шесть обычных игральных кубиков. Подбросьте их. Оставьте все кубики, на которых выпала шестерка. Остальные перебросьте. Убедитесь, что маловероятная комбинация 666666 (вероятность выпадения которой с одного раза равна 1 к 46 656) выпадет за сравнительно небольшое число попыток. Едва ли эксперимент займет больше нескольких минут. Это и есть отбор: вы отбираете полезные мутации (шестерки), а вредные отбраковываете (пятерки и т.д.).

Теперь посмотрим, как это все соотносится с тем, что мы наблюдаем в живой природе. Кишечная палочка — не самый простой организм, но для наших рассуждений даже она подойдет. Размер генома этой бактерии не 200, а 5 132 068 нуклеотидов ( $L$ ). Нуклеотиды бывают четырех типов: А, Т, Г и С ( $K = 4$ ). Для того чтобы «угадать» геном кишечной палочки нам бы потребовалось в среднем

лишь 54 раунда мутаций (один раунд перемешивает весь геном, сохраняя угаданные позиции).

Здесь есть несколько оговорок. Во-первых, мы предположили, что все «полезные» мутации фиксируются. В природе это не так. К счастью, для кишечной палочки существуют экспериментальные оценки темпов фиксации новых мутаций. В статье, опубликованной в журнале Nature, авторы следили за популяциями кишечных палочек на протяжении 60 тыс. поколений, читая бактериальные геномы каждые 500 поколений и отслеживая генетические изменения [2]. За это время в среднем около 70 мутаций были зафиксированы в популяции естественным отбором.

Учитывая, что кишечная палочка делится каждые 20 мин, мы получаем 30.5 мутации в год (в лабораторных условиях). В дикой среде темпы фиксации мутаций могут отличаться в зависимости от самых разных условий, но едва ли более чем на один-два порядка. Клеточная жизнь существует на Земле уже более 3 млрд лет. Но с указанными темпами фиксации (30.5 мутации в год) нужно лишь 168 264 года, чтобы набрать 5 132 068 зафиксированных мутаций (число, равное размеру генома кишечной палочки). Вероятно, что в природе бактерии размножаются медленней, чем в комфортной лаборатории, но вряд ли разница составляет более одного-двух порядков. С другой стороны, размеры популяций бактерий в природе гораздо выше. В любом случае мы видим, что времени более чем достаточно. Но есть еще одно важное допущение, которое пропущено во всех предыдущих рассуждениях и полностью игнорируется креационистами. Кто сказал, что в нашей игре в «Поле чудес» должно быть только одно идеальное слово, к которому нужно стремиться при угадывании? На практике существует огромное разнообразие жизни, в том числе бактерий. Значит, мы уже знаем, что «правильных» вариантов геномов очень много. Перед эволюцией никогда не стояла задача получить геном современной кишечной палочки. Если бы мы запустили развитие жизни по второму разу, вероятно, ничего похожего на кишечную палочку не появилось бы, а ее экологическую нишу (если бы таковая была) занял бы какой-то другой организм, с совсем другим наследственным материалом.

Представьте теперь, что вас устраивают не только шестерки. Например, если с первого раза выпало больше всего единиц, то далее мы будем собирать не шестерки, а единицы, еще быстрее достигая нужного результата. А потом снова удивляемся, откуда взялась «маловероятная» комбинация 111111. Путь, по которому могла пойти эволюция, несчетное количество. Как и число «потенциально хороших» геномов.

Кроме того, если взять геном современной кишечной палочки, то далеко не все нуклеотиды

в нем нуждаются в такой оптимизации, чтобы там была конкретная буква. Самый простой пример — синонимичные кодоны. Вот есть ген, кодирующий белок, в котором есть такая последовательность аминокислот: лейцин, пролин, гистидин, пролин. Предположим, что белок очень важный и его функция требует, чтобы все эти аминокислоты были на своем месте.

В ДНК лейцин может быть закодирован разными кодонами — ТТА, ТТГ, СТТ, СТС, СТА, СТГ; пролин — ССТ, ССА, ССС, ССГ; гистидин — САТ, САС. Эти тройки нуклеотидов ДНК, кодирующие одну и ту же аминокислоту, называются синонимичными. Использование конкретного кодона чаще всего имеет минимальное значение, если вообще имеет. Выходит, что нам нужно зафиксировать не строгую комбинацию из 12 нуклеотидов для связки лейцин-пролин-гистидин-пролин, а одну из 192, что в 192 раза увеличивает вероятность случайного появления такой комбинации. Но, возможно, существуют и другие комбинации аминокислот, которые сработали бы в белке не хуже, просто мы об этом не знаем, ведь эволюция пошла по другому пути. На самом деле многие белки у разных организмов выполняют похожие функции, но имеют довольно существенные отличия в последовательностях аминокислот. Одно и то же решение может быть достигнуто разными способами.

Итак, представьте, что вы играете в «Поле чудес». Правильных слов не одно, как вы предполагали ранее, а огромное количество, причем с разными написаниями. Стоит вам отгадать букву в определенном положении, и она с высокой вероятностью фиксируется. Согласитесь, что это отличается от требования отгадать одно-единственное слово целиком. Но именно так ошибочно представляют себе эволюцию креационисты.

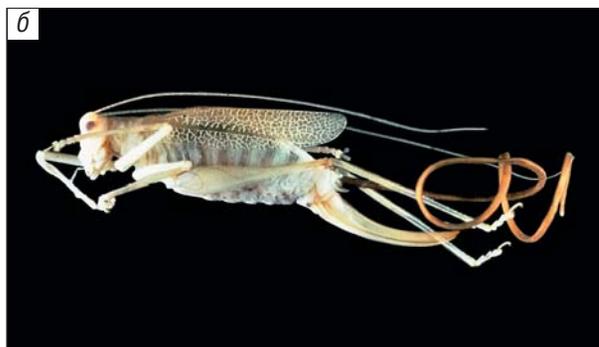
Тезис о том, что мы недооцениваем количество степеней свободы в эволюции биологических молекул, можно развить и проиллюстрировать конкретным примером. Недавно у нас с коллегами вышла статья, которая посвящена странностям в белок-кодирующих генах, обнаруженным после расшифровки митохондриального генома (мтДНК) волосатиков [3].

Волосатики (Nematomorpha) — тип червеобразных паразитоидных беспозвоночных животных, у которых личинки развиваются внутри членистоногих (насекомых или ракообразных), а взрослые свободно плавают в воде. Чтобы завершить свой жизненный цикл\*, выросший из личинки

червь должен попасть в водоем. Для этого он меняет поведение хозяина: зараженные насекомые (например, кузнечики или сверчки) практически совершают самоубийство, прыгая в воду [4, 5]. Там волосатик выходит наружу и уплывает на поиски партнера для спаривания. Механизмы столь хитрой манипуляции еще недостаточно изучены: предполагается, что личинки, достигшие последней стадии развития, продуцируют эффекторные молекулы, которые влияют на центральную нервную систему хозяина [6, 7]. Однако оказалось, что это далеко не самое удивительное свойство Nematomorpha.

Митохондрии — внутриклеточные органеллы, которые играют важную роль в клеточном дыхании, — обладают собственной ДНК (размером около 15 тыс. пар нуклеотидов), которая обычно содержит 13 белок-кодирующих генов. Чтобы разобраться в их «странностях» у волосатиков, прибегаем к метафоре.

Нуклеотидную последовательность ДНК часто сравнивают с текстом, написанным с помощью ал-



Волосатики: а — самец (справа) и самка *Paragordius tricuspidatus*, б — повзрослевший *Spinochordodes* покидает своего хозяина, кузнечика *Mecanema thalassinum*.

Фото A.Schmidt-Rhaesa

Зоологический музей Гамбургского университета (Германия)

\* В дополнительных материалах к статье [4] авторы приводят ссылку на видео жизненного цикла волосатиков (предупреждаю, зрелище не для слабонервных), которая почему-то не работает, но эта запись опубликована на канале DEEP LOOK: [www.youtube.com/watch?time\\_continue=1&v=YB6O7jS\\_VBM](http://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=YB6O7jS_VBM).

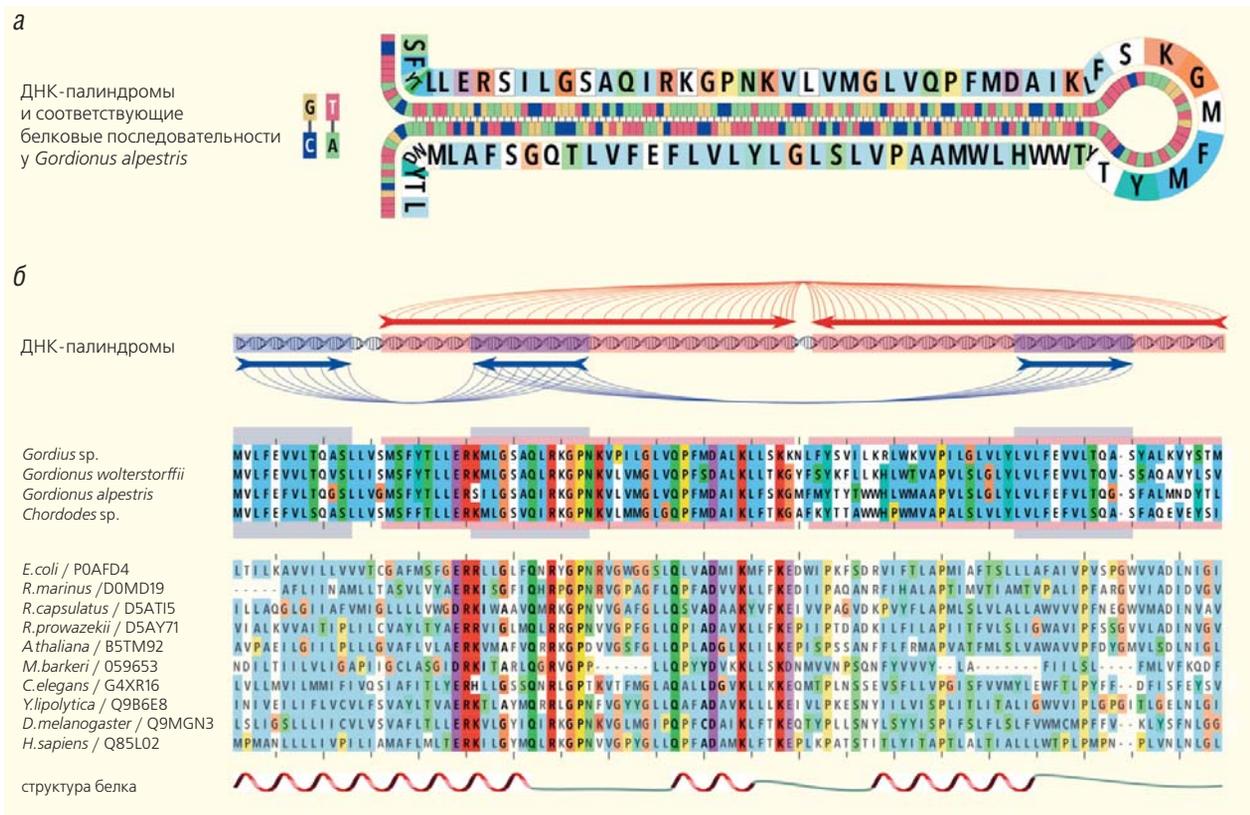
фавита, состоящего из четырех букв (А, Т, G, С). В этом тексте встречаются отдельные осмысленные «высказывания» — гены, кодирующие синтез белков. Как, например, в поваренной книге — отдельные рецепты, позволяющие приготовить то или иное блюдо.

Теперь представьте, что вы взяли поваренную книгу и читаете рецепт. Он осмысленный — и, следуя ему, можно получить отличную яичницу. Но тут вы замечаете, что, если читать его по буквам задом наперед, вы снова получаете рецепт яичницы, причем тот же самый. Далее вы узнаете, что и многие другие рецепты из этой книги тоже так написаны. Это и странно, и удивительно. И именно это мы видим в «поваренной книге» митохондриального генома волосатиков.

Фраза «Ура!» — вопите, дети, повару!», если опустить пунктуацию, читается одинаково слева направо и справа налево. Такие фразы называют палиндромами. Важно оговориться, что палиндромы в ДНК, о которых идет речь, имеют немного другое определение. Например, ДНК-палиндромом будет считаться такая последовательность букв: АТТGСААТ. Дело в том, что в двойной спирали ДНК действует принцип комплементарности:

напротив А стоит Т, напротив G — С. Палиндромная ДНК может сама с собой образовать двойную спираль. В нашем примере (АТТGСААТ) первая буква А комплементарна последней Т, вторая Т — предпоследней А и т.д. Вот еще один, совсем простой палиндром: GGGGCCCC. Но, как и в случае палиндромов в обычном языке, левая половина высказывания полностью определяет правую.

Оказалось, что большинство митохондриальных генов волосатиков содержит палиндромы, причем порой значительного размера — до 284 букв, без единой ошибки, целиком находящиеся внутри гена. Получается, что на каждый нуклеотид в ДНК таких участков наложено сразу два ограничения: рецепт белка по-прежнему должен быть хорошим, но нуклеотиды в левой и правой его частях должны быть «сцеплены». Мы посмотрели, можно ли найти что-то похожее в уже известных митохондриальных геномах (всего на момент исследования их было прочитано 8952). Оказалось, что отдельные более короткие палиндромы в отдельных генах можно найти и у других видов, но волосатики исключительны в масштабах этого явления — по максимальной длине палиндромов, по их числу и количеству затронутых генов.



Палиндром (нуклеотидная последовательность) волосатика *Gordionus alpestris* и аминокислотная последовательность кодируемого белка (а). Удивительно, что участки ДНК могут быть частью сразу двух палиндромов (красные и синие дуги) и что кодируемые белки не только сходны у разных видов волосатиков (*Gordionus sp.*, *Gordionus wolterstorffii*, *Gordionus alpestris*, *Chordodes sp.*), но и похожи на родственные белки других организмов — кишечной палочки (*E. coli*), плодовой мушки (*D. melanogaster*), человека (*H. sapiens*) и др. Здесь и далее схемы подготовлены О.Занегиной.

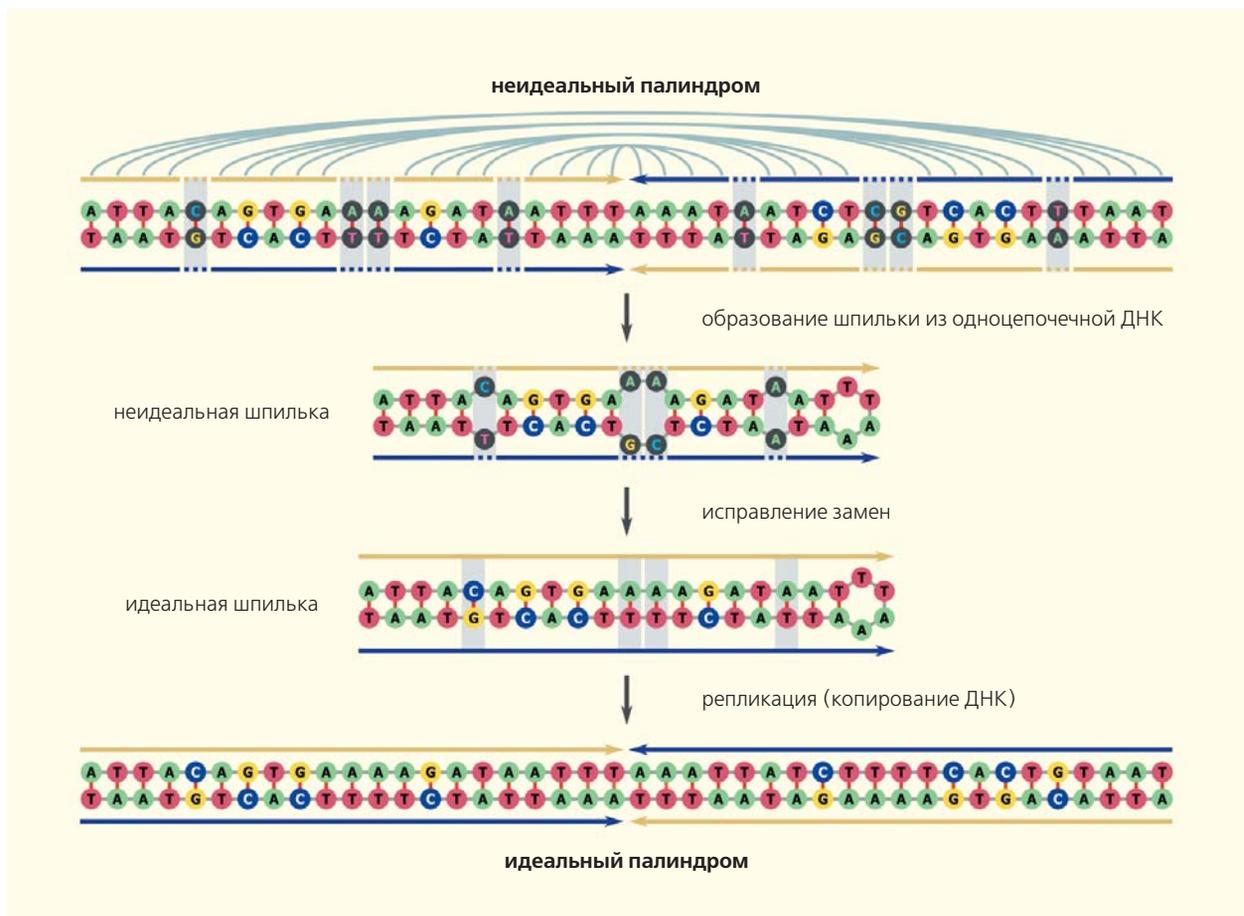
Разумеется, мы опасались, что все это может быть ошибкой. Наши приборы могли неправильно прочитать ДНК. Уж больно это удивительно. Тогда были проделаны дополнительные эксперименты. Например, выделяли из волосатика мтДНК, сильно разбавляли, нагревали, чтобы двойные спирали развалились на отдельные цепочки, а потом охлаждали. К этому раствору добавляли специальные ферменты, которые разрушают одноцепочечную ДНК, при этом двуцепочечная сохраняется. Палиндромные участки одноцепочечной ДНК образуют двойные спирали сами с собой, поэтому выживают. Остальная ДНК разрушается. В таких условиях происходило обогащение именно тех участков ДНК, которые были определены как палиндромы. Эти и еще масса других данных подтвердили нашу гипотезу, и появились все основания поверить в наши находки (подробности см. в статье [3]).

Всего мы изучили митохондрии четырех видов волосатиков (*Gordius* sp., *Gordionus wolterstorffii*, *Gordionus alpestris*, *Chordodes* sp.). Многие из палиндромных участков ДНК совпадали между видами. Это значит, что возникли они давно — у общего предка изученных видов. Интересно, что в самих последовательностях палиндромной ДНК были

межвидовые отличия, но на каждое изменение в левой половине палиндрома мы находили изменение в его правой части, сохраняющее идеальное соответствие между ними.

Для чего это может быть нужно? Одна из гипотез заключалась в том, что, когда волосатик находится внутри хозяина, ему нужно меньше дышать, а палиндромы в генах дыхательных белков служат для выключения синтеза соответствующих им белков (например, через образование шпильки в соответствующих молекулах РНК). Но сравнение дыхательной активности митохондрий, взятых из волосатиков, которые были в воде или в теле хозяина, не выявили каких-то отличий (это не доказывает, что их нет, просто наши методы не позволили это обнаружить).

Нам кажется более правдоподобной версия, согласно которой эти палиндромы сами по себе не нужны ни для чего. Возможно, у волосатиков есть какой-то механизм починки мтДНК, который оказался способным удлинять небольшие неидеальные палиндромы и делать их идеальными. Представьте, что в какой-то момент две цепочки мтДНК волосатика расплетаются на две одиночные цепи (как это и наблюдают у некото-



Возможный механизм исправления ошибок (репарации неправильно спаренных нуклеотидов) в мтДНК у волосатиков, который позволяет удлинять небольшие неидеальные палиндромы и делать их идеальными.

рых других организмов). В каких-то местах у нас есть маленькие палиндромы, возможно, возникшие случайно. Они способствуют тому, что часть одноцепочечной ДНК сама с собой образует двойную спираль. Затем механизм починки ДНК исправляет несоответствия, удлиняя палиндром. Подобные механизмы репарации известны и даже описаны в митохондриях некоторых видов, хотя к появлению палиндромов это само по себе не приводит. Разумеется, все это время продолжает действовать естественный отбор — если такое исправление портит ген, то митохондрия оказывается менее жизнеспособной и в итоге не обнаруживается у последующих поколений. Но все безвредные замены в пользу удлинения палиндромов фиксируются. Неидеальные палиндромы становятся идеальными.

Но как обстоят дела на самом деле, мы не знаем. В любом случае это удивительная ситуация, когда эволюция вынуждена искать компромиссы: с одной стороны, ген должен кодировать функциональный белок, с другой — есть это странное требование, чтобы нуклеотиды образовывали палиндром. Известно, что один и тот же по функции белок можно получить разными способами, используя разные последовательности ДНК, и в итоге отбираются такие последовательности нуклеотидов, которые подходят сразу по двум параметрам. Итак, мы недооценивали количество степеней свободы в эволюции белков. Вот такая интересная наука. ■

Над проектом по изучению митохондриальных геномов волосатиков работал большой коллектив: Кирилл Михайлов, Борис Ефеев, Александр Панчин, Дмитрий Кнорре, Мария Логачева, Алексей Пенин, Мария Мунтян, Михаил Никитин, Ольга Попова, Ольга Занегина, Михаил Высоких, Сергей Спиридонов, Владимир Алешин и Юрий Панчин.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Проекты 14-50-00150 (секвенирование и экспериментальные процедуры) и 19-74-20147 (биоинформатический анализ).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Проекты 14-50-00150 (секвенирование и экспериментальные процедуры) и 19-74-20147 (биоинформатический анализ).

## Литература / References

1. Wilf H.S., Ewens W.J. There's plenty of time for evolution. PNAS. 2010; 107(52): 22454–22456. DOI:10.1073/pnas.1016207107.
2. Good B.H., McDonald M.J., Barrick J.E. et al. The Dynamics of Molecular Evolution Over 60,000 Generations. Nature. 2017; 551(7678): 45–50. DOI:10.1038/nature24287.
3. Mikhailov K.V., Efeykin B.D., Panchin A.Y. et al. Coding palindromes in mitochondrial genes of Nematomorpha. Nucleic Acids Research. 2019; gkz517. DOI:10.1093/nar/gkz517.
4. Thomas F., Schmidt-Rhaesa A., Martin G. et al. Do hairworms (Nematomorpha) manipulate the water seeking behaviour of their terrestrial hosts? J. Evol. Biol. 2002; 15(3): 356–361. DOI:10.1046/j.1420-9101.2002.00410.x.
5. Thomas F., Ulitsky P., Augier R. et al. Biochemical and histological changes in the brain of the cricket *Nemobius sylvestris* infected by a manipulative parasite *Paragordius tricuspidatus* (Nematomorpha). Int. J. Parasitol. 2003; 33(4): 435–443. DOI:10.1016/S0020-7519(03)00014-6.
6. Biron D.G., Ponton F., Joly C. et al. Water-seeking behavior in insects harboring hairworms: should the host collaborate? Behav. Ecol. 2005; 16(3): 656–660. DOI:10.1093/beheco/ari039.
7. Biron D.G., Marche L., Ponton F. et al. Behavioural manipulation in a grasshopper harbouring hairworm: a proteomics approach. Proc. Biol. Sci. 2005; 272 (1577): 2117–21126. DOI:10.1098/rspb.2005.3213.

## Hairworms and the Degrees of Freedom in the Evolution of Proteins

A.Yu.Panchin

Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, RAS (Moscow, Russia)

Creationists often bring up the argument that self-assembly of complex biological molecules is impossible and that it is highly unlikely for numerous beneficial mutations to accumulate consecutively. However, such estimates do not account for natural selection and the multiple degrees of freedom in the evolution of life — different ways to assemble molecules of similar functions. For example, the same protein can be encoded by different DNA sequences. We expanded the current estimates of the degrees of freedom in protein evolution by sequencing the mitochondrial genomes of four hairworm (Nematomorpha) species. We found that these genomes contain extraordinary large palindromes in protein-coding genes. While the function of these palindromic sequences remains elusive, they represent an unusual case: on one hand, a gene must encode a functional protein, but on the other — the gene sequence is restricted by the arbitrary limitation, that its nucleotide sequence maintains a palindrome. As it occurs, even in these circumstances the preservation of the function of complex and important proteins is possible.

**Keywords:** hairworms, Nematomorpha, parasitoidism, mitochondrial DNA, inverted repeats in the protein-coding genes, palindromes, creation, evolution.

# Амулет древних морских зверобоев с побережья Охотского моря

кандидат исторических наук А.И.Лебединцев

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт имени Н.А.Шило ДВО РАН (Магадан, Россия)  
lebedintsev@neisri.ru

В статье представлены новые сведения о культурном своеобразии токаревской культуры морских зверобоев, существовавшей в эпоху раннего металла на северном побережье Охотского моря. Археологические находки на стоянке Ольской в сочетании с данными палеогенетического анализа антропологического материала, полученного с территории этого древнего поселения, позволяют уточнить взаимосвязи токаревцев с палеоэско-алеутской общностью.

**Ключевые слова:** Северное Приохотье, токаревская культура, эпоха палеометалла, художественное творчество токаревцев, палеогенетический анализ антропологических материалов.

В VIII в. до н.э. — V в. н.э. на северном побережье Охотского моря существовала токаревская культура морских зверобоев эпохи раннего металла. В ходе многолетних археологических исследований в древних поселениях охотников обнаружены костяные изделия со следами от металлических орудий и каменные подвески — о многих открытиях автор рассказал на страницах журнала «Природа»\*. Стоянки токаревцев расположены в устьях рек Окса и Ойра, впадающих в Охотское море в районе Тауйской губы, на островах Завьялова, Недоразумения, Спафарьева, Талан, в бухте Токарева и на мысе Восточный (Ольский) [1]. Новая находка на стоянке Ольской позволила расширить представление о художественных изделиях культуры морских зверобоев Северного Приохотья. Речь идет о необычной объемной костяной подвеске с изображением морского животного. Есть основания полагать, что в сочетании с опубликованными в 2019 г. результатами палеогенетического анализа антропологических материалов, собранных на стоянке Ольской [2], это произведение художественного творчества охотников эпохи палеометалла поможет уточнить научные знания о взаимосвязях народов крайнего северо-востока Сибири. Но обо всем по порядку.

\* Антропоморфная подвеска с Охотского побережья (1981. №3. С.120); Древнее искусство морских зверобоев (1983. №10. С.120); Появление железа на Охотском побережье (1989. №2. С.138–140); Гребень с охотничьим сюжетом из Северного Приохотья (2015. №10. С.94); Подвеска с соляной символикой из Северного Приохотья (2017. №4. С.95).

Хозяйство токаревцев было ориентировано в основном на прибрежные ресурсы [3]. Они занимались охотой на мелких тюленей, рыболовством и собирательством. На стоянках найдены кости морских млекопитающих, оленей, медведей. В морском промысле токаревцы использовали гарпуны с поворотными и зубчатыми наконечниками, добывая птиц и наземных животных, применяли сложные луки. Охота на китов носила, по видимому, случайный характер. Добычей древних жителей могли становиться и киты, выброшенные морем на берег.

Приморский уклад жизни способствовал появлению и развитию художественных изделий из камня и кости с использованием оригинальных приемов изобразительного искусства. В Северном Приохотье на стоянках Токарева и Спафарьева обнаружены значительные коллекции подвесок из камня, изображающих человека, морских животных, птиц. Примечательно, что на этих произведениях и на костяных изделиях токаревцев широко представлены орнаментальные мотивы, подобные тем, что были известны эскимосам с начала 1-го тысячелетия н.э. Черты сходства орнаментального творчества токаревцев, эскимосов и алеутов подтверждены этнографическими данными.

Стоянка Ольская на мысе Восточный (в 3 км от бывшего пос. Старая Веселая) датируется второй половиной 1-го тысячелетия до н.э. — началом 1-го тысячелетия н.э., т.е. относится к эпохе палеометалла. Это древнее поселение, предположительно имевшее площадь 9000 м<sup>2</sup>, находится на трехметровой террасе, на поверхности которой насчитывает-

ся 26 округлых жилищных впадин диаметром 5–9 м и глубиной 0.4–0.7 м [1]. Культурный слой залегает под дерном, на гальке с валунами и изобилует костями ластоногих и раковинами моллюсков; встречаются и китовые кости — все это свидетельствует об активном морском промысле древних обитателей стоянки. Найдено множество изделий из костей кита, ластоногих, птиц, рогов оленей. Из такого материала морские охотники изготавливали наконечники копий и стрел, острог и гарпунов (в том числе поворотного типа), тесла, мотыги, лопаты, рыболовные крючки, гребни, шилья, иглы, проколки, игольники. Особенно примечательны рукоятки резцов или гравировальных инструментов с пазами для металлических (железных) вкладышей. Один из них украшен орнаментом из параллельно расположенных косых линий, прочерченных вдоль плоскости изделия. Обнаружен обломок моржового клыка со следами сколов. Костяной материал Ольского поселения близок находкам с верхней стоянки о.Завьялова и стоянки на о.Спафарьева. Недавно было обнаружено уникальное изделие, впервые встреченное на токаревских стоянках: подвеска из рога оленя, изображающая морского зверя — возможно, нерпу в сидячей позе.

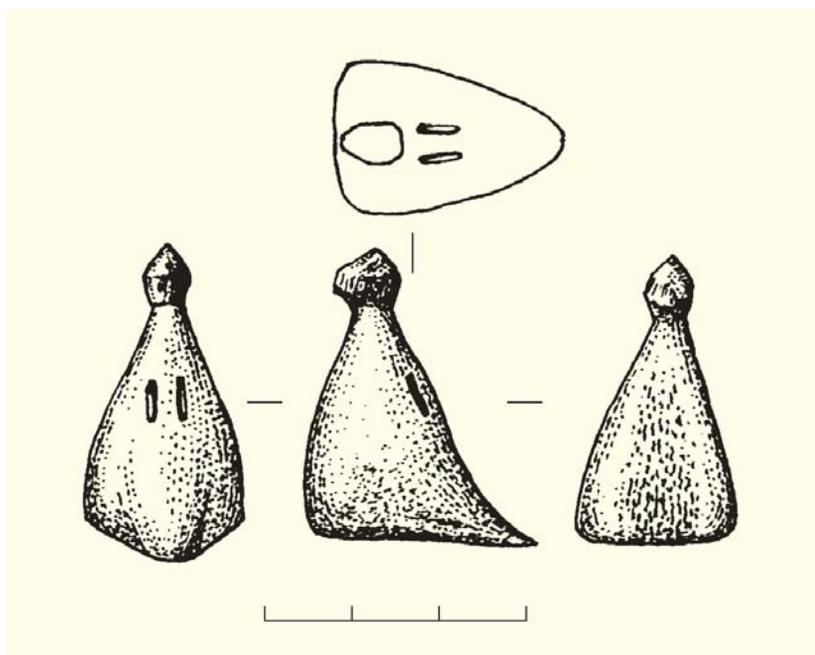
В верхней части необычной костяной подвески срезами выделена голова животного, затем следует расширяющееся туловище. Основание подвески плоское. В спинной части изображения вырезаны два щелевидных отверстия, которые соединяются между собой, — через них продевался шнурок для подвешивания. На поверхности фигурки видны следы работы металлическим инструментом. Ранее на других стоянках токаревской культуры (Токарева, Спафарьева) были найдены подвески из шлифованных каменных пластинок, среди которых есть «портреты» морских млекопитающих [1]. Но, в отличие от этих плоских, сделанных в профиль изображений, костяная подвеска со стоянки Ольская имеет объемные формы, передающие реальные



Вид на побережье в районе бухты Гертнера (п-ов Старицкого). Мыс Восточный расположен слева в нижней части.

пропорции зверя. Мы полагаем, что она могла быть не только украшением, но и амулетом, выполнявшим роль личного охранителя и помощника. Жизнь древних людей всецело зависела от сил природы. И для того чтобы охота удалась, зверьбой изготавливал подвески с изображением тех животных, которых он добывал.

В водах Тауйской губы обитают представители пяти видов ластоногих — настоящих тюленей: морской заяц, или лахтак (*Erignathus barbatus*); пе-



Костяная подвеска с изображением морского животного со стоянки Ольская. Вторая половина 1-го тысячелетия до н.э. — начало 1-го тысячелетия н.э.

страя нерпа, или ларга (*Phoca larga*); кольчатая нерпа, или акиба (*Pusa hispida*), и крылатка, или полосатый тюлень (*Histiophoca fasciata*). Лахтак и ларга часто устраивают береговые лежбища на галечных и песчаных отмелях. Из крупных морских млекопитающих в этом районе водятся сивучи, или Северные морские львы (*Eumetopias jubatus*), относящиеся к ушастым тюленям [3]. Все эти животные издавна служат объектом промысла и были важным пищевым ресурсом древних зверобоев. Учитывая пропорции тела перечисленных морских млекопитающих и то, что в прибрежной части Тауйской губы распространены наиболее массовые виды тюленей акиба и ларга, можно предположить, что именно эти обитатели Охотского моря изображены на подвеске из Ольского поселения.

Иконография фигурки морского зверя вполне соответствует времени существования токаревых; с другой стороны, она отражает эско-алеутские художественные традиции. Недавно по образцу кости человека со стоянки Ольская ученые-генетики с высокой степенью достоверности установили, что в популяции токаревых присутствовали носители палеоэскимосской гаплогруппы [3]. И этот факт дополняет ранее известные сведения.

Появление на Северном побережье Охотского моря высокотехнологичной токаревской культуры морских охотников, наряду с отсутствием археологических данных о ее постепенном формирова-

нии в этом регионе, позволяет предполагать генетические связи с палеоэскимосской традицией Чукотки, а также возможность независимой миграции в Северное Приохотье палеоэско-алеутских групп с юго-западной части Аляски и с Алеутских о-вов. Палеогенетический анализ антропологических материалов стоянки Ольская показал: индивиды токаревской культуры принадлежат к гаплогруппам\* G1b и D2a1 мтДНК и были потомками древней палеосибирской популяции, представленной геномом человека из Дуванного Яра (его возраст составляет примерно 9,8 тыс. лет) [2], а также ближайшими родственниками индивида палеоэскимосской культуры саккак (4170–3600 лет назад, обнаруженного в Западной Гренландии. Таким образом, на северном побережье Охотского моря впервые обнаружена древняя палеоэскимосская гаплогруппа D2a1 мтДНК.

Новейшие данные междисциплинарных исследований позволяют сделать вывод: токаревская культура морских зверобоев Северного Приохотья сформировалась на основе палеоэско-алеутских и внутриконтинентальных колымских групп, а на поздних этапах культурогенеза в ее развитии принимал участие нижнеамурский культурный компонент. ■

\* Гаплогруппа — группа схожих гаплотипов, имеющих общего предка, у которого произошла мутация, унаследованная всеми потомками.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта 19-09-00144 «Древние приморские культуры Северного Приохотья и Камчатки в контексте освоения человеком Северной Пацифики».**

## Литература

1. Лебединцев А.И. Древние приморские культуры Северо-Западного Приохотья. Л., 1990. [*Lebedintsev A.I. The Ancient Maritime cultures of the North-Western Priokhot'e. Leningrad, 1990 (In Russ.)*.]
2. Sikora M., Pitulko V., Sousa V. et al. The population history of northeastern Siberia since the Pleistocene. *Nature*. 2019; 570: 182–188.
3. Ландшафты, климат и природные ресурсы Тауйской губы Охотского моря. Владивосток, 2006. [*Landscapes, climate and natural resources of the Gulf of Tauisk, the Sea of Okhotsk. Vladivostok, 2006. (In Russ.)*.]

## Amulet of Ancient Marine Hunters from the Coast of the Sea of Okhotsk

A.I. Lebedintsev

N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far-East Branch of RAS (Magadan, Russia)

The article presents new information about the cultural identity of Tokarev culture of sea hunters, which existed in the Early Metal Ages on the Northern coast of the Sea of Okhotsk. Archaeological finds in the Olskaya Site in combination with data of paleogenetic analysis of the anthropological material, obtained from this ancient settlement, clarify genetic relationships of the Tokarev people with Paleo Esko-Aleutian community.

**Keywords:** Northern Priokhotye, Tokarev culture, paleometal epoch, artistic creativity of the Tokarev people, paleogenetics analysis of anthropological material.

# Предел Кардашёва

**З**начение ученого определяется его открытиями и идеями. 3 августа 2019 г. умер Николай Семенович Кардашёв, которому принадлежат несколько важнейших идей, определивших лицо астрономии в последние десятилетия.

Кардашёв был необычным ученым. Кто он был — теоретик или экспериментатор? В XX в. науки не только разбежались по клеточкам, но и методы исследования разделились просто пополам, поэтому одних ученых стали относить к теоретикам, а других — к экспериментаторам. Однако Кардашёв не классифицируется! Перефразируя Булгакова, можно сказать: Кардашёв не вмещается в шляпу, господи нищие\*! Он, как и его учитель — Иосиф Самуилович Шкловский\*\*, любил добывать знания любыми путями. Это тот самый дух естествоиспытательства, когда хочется Вселенную попробовать на зуб. «Коля везунчик, — повторял Шкловский, — он обязательно откроет внеземную жизнь». Не успел! Но человечество приблизилось к этому моменту как никогда близко — на масштабе жизни одного поколения. И приближал его в том числе Николай Семенович. Поэтому и вошла в науку о Вселенной классификация цивилизаций Кардашёва. Это была классификация физика, знающего астрономию. Парадокс Ферми он решал



Николай Семенович Кардашёв  
25.04.1932–03.08.2019

очень просто: сверхцивилизации есть! Как и его учитель, он опирался на факты: единственная известная науке цивилизация — наша, и она, будучи пожирателем энергии, живет по формуле геометрической прогрессии. Следовательно, сначала любая внеземная жизнь становится технологической, если использует энергию, как земная цивилизация (I тип), потом поглощает энергию звезды, благодаря которой она возникла (II тип), а затем становится сверхцивилизацией, покорившей энергию всего звездного дома — галактики (III тип). Вот такие расчеты. Хочу подчеркнуть, что в этой пограничной области, которую вспахали философы-гении (типа Джордано Бруно и Николая Федорова-Гагарина), почти не было формул и конкретных цифр. Кроме формулы Дрейка был только парадокс Ферми, сформулированный в столовке Лос-Аламоса. Кардашёв переложил проблему внеземных цивилизаций на рельсы конкретных расчетов. Вот вам и Вселенная, жизнь, разум\*\*\*!

\* Из монолога генерала Чарноты (к/ф «Бег», реж. А.Алов и В.Наумов, 1970): «Россия не вмещается в шляпу, господи нищие!».

\*\* Иосиф Самуилович Шкловский (1916–1985) — член-корреспондент АН СССР, основатель школы современной астрофизики. Спустя год после его смерти в «Природе» (1986. №6. С.84–95) была опубликована статья Н.С.Кардашёва и Л.С.Марочника «Феномен Шкловского», которая началась словами: «1 июля 1986 г. Иосифу Самуиловичу Шкловскому — человеку, оказавшему заметное, во многом определяющее влияние на современную астрофизику — исполнилось бы 70 лет. Это не некролог. Некрологи пишутся по определенным канонам, в рамки которых личность Иосифа Самуиловича не вписывается». Последняя фраза удивительным образом переключается со шляпой, в которую не вмещается Кардашёв. — *Примеч. ред.*

\*\*\* «Вселенная, жизнь, разум» — так называется знаменитая книга И.С.Шкловского, впервые вышедшая в 1962 г. Она выросла из статьи «Возможна ли связь с разумными существами других планет?», опубликованной в 1960 г. в июльском номере «Природы» (С.21–30). — *Примеч. ред.*

А начал он с блестящей работы 1959 г. про Вселенную и атом\*. Братцы, как много у нас неправильных теорий, объясняющих открытое явление, и как мало открытий, подтверждающих хорошую идею! Еще меньше тех, кто смог увидеть подтверждение своих размышлений о том, что происходит в миллиардах километров от Земли. И совсем уж мало кому везет увидеть подтверждение своей теории буквально через несколько лет. Так вот, все знают, что атомы очень маленькие. Но не все знают, что это неправильно! Атом Бора может быть бесконечно большим. Но только при одном условии — если рядом нет других атомов. А такое условие вполне может реализоваться в нашей Галактике, где в кубическом сантиметре может быть только один атом. Атомы могут быть размером с кукурузные хлопья. Но электрон, попадая на границу атома, долго там не задержится и начнет перебираться поближе к ядру, перепрыгивая с уровня на уровень и излучая кванты света. Так вот, Кардашёв первым показал, что такие атомы можно наблюдать с помощью современных на тот момент радиотелескопов, что и было вскоре подтверждено экспериментально.

Через пять лет (в 1964 г.) он напишет другую важную работу, где покажет, что в нашей Вселенной нейтронные звезды могут черпать энергию из энергии своего вращения посредством магнитного поля\*\*. Так работают тысячи радиопульсаров, и самый главный из них, конечно, находится в той самой Крабовидной туманности, о которой он писал в статье. Почему эта идея важна? Потому что к началу 1960-х годов считалось, что во Вселенной светят только обычные звезды, и светят они за счет ядерных реакций. Но вот в 1964-м Кардашёв нашел еще один источник энергии небесных тел. Рассказывая об этом студентам, я обычно привожу пример в духе Кардашёва: когда потухнет Солнце, наша цивилизация может перебраться к радиопульсару и использовать энергию его вращения сотни миллиардов лет.

В 70-е Кардашёв придумал, как найти на небе те семена, из которых выросли все объекты Вселенной. Так возник замечательный советский космический аппарат «Реликт-1», который действительно открыл так называемые флуктуации реликтового фона. Да, это опять была радиоастрономия, но очень коротких волн. К сожалению, американцы вначале не подтвердили этот

результат, и Нобелевская премия снова не была вручена советскому астрофизику — Николаю Кардашёву. Однако пятнышко, найденное первым «Реликтом», было позже подтверждено. Со спутником «Реликт» Кардашёв шагнул в космос, доказывая на своем примере страсть цивилизации захватывать Вселенную. Потом был первый в мире космический радиотелескоп — космическая обсерватория «Радиоастрон» — и попытки увидеть черную дыру. А на самом деле — вовсе не дыру, а «кротовую нору» в другую Вселенную. Последнее детище Николая Семеновича — это космический радиотелескоп, венчающий его очень давнюю идею о радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами. А недавно мы стали свидетелями того, как с помощью той же идеи западные ученые впервые «увидели» черную дыру. Конечно, если бы был «Реликт-2», спутник, который вывел бы нашу страну в мировые лидеры исследования ранней Вселенной, или «Миллиметр», который теперь уже делают его ученики и с его помощью подробно рассматривают черные дыры.

Сегодня мы простились не просто с Большим Ученым, а с одним из последних представителей особого направления в советской, российской, русской науке. Этот исчезающий тип русского интеллигента — мягкого и внимательного в обращении с коллегами любого ранга и абсолютно неуступчивого в отстаивании своей позиции — мне бесконечно дорог. Я сам не такой. Я часто срываюсь. Но я очень ценю таких людей. Разговаривая с вами, они не просто полагаются на презумпцию вашей интеллигентности, а, я бы сказал, одаряют вас такими качествами и способностями, что вызывает неловкость. Сегодняшнее прощание было вообще не в его духе. Президент РАН не приехал. Хорошо сказал однокашник Кардашёва по астрономическому кружку — тоже всемирно известный ученый Игорь Дмитриевич Новиков: «В самую трудную минуту моей жизни Коля фактически спас меня, подставив плечо, что бывает не так часто между учеными соперничающих школ и лишь благодаря их великодушию» (не дословно).

И еще хочу сказать, что с уходом Николая Семеновича такое понятие, как «гамбургский счет»\*\*\*, окончательно превратится в нашей академии в «гамбургерский»...

\* Кардашёв Н.С. О возможности обнаружения разрешенных линий атомарного водорода в радиодиапазоне. *Астрономический журнал*. 1959; 36(5): 838–844.

\*\* Кардашёв Н.С. Магнитный коллапс и природа космического радиоизлучения. *Астрономический журнал*. 1964; 41(5): 807–813.

\*\*\* Этот фразеологизм любил использовать Кардашёв. «Природу» читают в основном научные работники. Все они знают, что между собой профессионалы в науке судят друг о друге по гамбургскому счету», — писал он в уже упомянутой статье о своем учителе и тут же в примечании добавлял, что Шкловский «часто употреблял этот термин, который восходит к книге его дальнего родственника писателя В.Б.Шкловского «Гамбургский счет»» (1986. №6. С.88). — *Примеч. ред.*

Но вот приведу отрывок из моей последней книги\*:

*Что делать? (вместо заключения).*

*Николай Семенович Кардашёв — замечательный советский и российский астрофизик, академик, один из энтузиастов поиска внеземных цивилизаций, когда слышит не очень оптимистичные вещи о разумной жизни во Вселенной, о судьбе науки и цивилизации в духе тупиковой ветви, часто спрашивает с неким укором и призывом: «Что ж делать? Где она, положительная программа ученого XXI в.?»*

*Конечно, мы все — «оптимисты» и «пессимисты» — наследники научно-технологической революционной эпохи. Мы — дети гагаринской эпохи! Мы любим знать! Мы обожаем искать, найти и не сдаваться. Но при этом я считаю, мы должны ставить вопросы так честно, как мы их видим. Если я говорю, что не могу представить 1000 революций в физике и тысячу Эйнштейнов, то действительно не могу этого представить. Это какая-то дурная бесконечность! На самом деле будущее настолько не похоже ни на что прошедшее на отрезке в несколько столетий от Леонардо, Галилея, Ньютона, Лобачевского, Эйнштейна..., что его (будущего) приход будет означать катастрофическое (в хорошем смысле этого слова) изменение нашего мышле-*

*ния. Знали ли члены афинской академии, что не пройдет и несколько столетий, как на тысячелетие замрет человеческая мысль. Это «небольшое» молчание разума обернулось гибелью тысяч дерзновенных умов и не начавшихся жизней. Поэтому мы должны продолжать и дальше искать ответы. В конце концов, в этом и состоит отличие разума от своей противоположности...*

Но вот еще штрих к его портрету. Как-то принято считать, что все хорошие идеи рождаются в молодости. А я думаю, нет. Это бюрократы от науки стареют. Большой ученый работает до самых последних минут своей жизни. И кажется, все — мол, был хороший ученый, исписался... Но нет-нет да выдаст идею и сразу видно «льва по когтям». Как-то среди разрухи (шел 1995 год) мне в руки попала теоретическая статья Николая Семеновича про ускорение космических лучей вблизи черной дыры. У меня, как говорится, аж дыхание сперло: в ней Кардашёв нашел предел суперколлайдера, т.е. максимальную энергию, до которой можно ускорить частицу в нашей Вселенной! Конечно, речь идет о космическом суперколлайдере, который можно устроить с помощью черной дыры. Оказалось, этот предел меньше самой большой (планковской) энергии всего лишь в 10 раз (корень из постоянной тонкой структуры\*\*). Вот так предел Кардашёва! Так я и называю его на своих лекциях. ■

\* Приводится цитата из книги В.М.Липунова «От Большого взрыва до Великого молчания» (М.: АСТ, 2018), которая вошла в «Длинный список» премии «Просветитель» 2019 г. — Примеч. ред.

\*\* Постоянная тонкой структуры равна  $1/137$ , корень квадратный примерно равен  $1/10$ .

© доктор физико-математических наук **В.М.Липунов**  
Физический факультет Московского государственного университета  
имени М.В.Ломоносова

## От редакции

Ушел из жизни Николай Семенович Кардашёв, выдающийся советский, российский астрофизик, академик РАН, директор Астрокосмического центра Физического института имени П.Н.Лебедева РАН (ФИАН), да просто — замечательный человек. Каким он был ученым — был ли он теоретиком или экспериментатором, какие его научные результаты «по гамбургскому счету» останутся в анналах науки и кем он был для коллег, хорошо написал Владимир Михайлович Липунов. Для нас же Николай Семенович был членом редколлегии (правда, очень недолго — с 1991 по 1993 г.) и автором «Природы». К сожалению, мы не можем назвать его постоянным автором, ему принадлежит (в соавторстве с Л.С.Марочником) всего одна (но какая!) статья — «Феномен Шкловского», опубликованная в июньском номере 1986 г. и вошедшая в золотой фонд нашего журнала. Нестандартно задуманная, написанная на одном дыхании, с огромным уважением к Иосифу Самуиловичу Шкловскому, чьим самым любимым учеником был Кардашёв, статья имела непростую историю подготовки. Некоторые члены редколлегии требовали убрать из текста ряд мест, в которых достаточно откровенно, без ретуши, без прикрас, описывались факты академической жизни (в основном это относилось к выдержкам из новелл Шкловского). И тут мы познакомились с настоящим Николаем Семеновичем, который при всей своей интеллигентности и мягкости, как оказалось, обладал абсолютно железным характером, а потому наотрез отказался что-либо менять в статье. В итоге она появилась в первоначальном виде и имела большой резонанс. По-видимому, эти качества играли не последнюю роль и в научной жизни Н.С.Кардашёва, в том, что в непростых условиях ему удалось сохранить отдел, созданный И.С.Шкловским в Институте космических исследований, преобразовав его в конечном итоге в Астрокосмический центр ФИАН.

**Издательство** предлагает услуги по редакционно-издательской подготовке материалов, сборников, а также весь комплекс полиграфических услуг

**Издательство «Наука»** готово оказать услуги под ключ по организации и проведению семинаров, конференций, презентаций, выставок в конференц-залах и на экспозиционных площадках издательства по адресам:

г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1  
г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 90  
Московская обл., г. Люберцы, Октябрьский пр-кт, д. 403

По всем интересующим вопросам обращайтесь по тел.: +7(495)276-1197 доб. 3321, 3371, 2241  
Подробная информация на сайте [www.naukapublishers.ru/history/partnership](http://www.naukapublishers.ru/history/partnership)

# ПРИРОДА

8/2019

Соучредители: РАН, ФГУП «Издательство «Наука»  
Главный редактор: А.Ф.Андреев  
Заместитель главного редактора: А.В.Бялко

Ответственный секретарь  
Е.А.Кудряшова

Научные редакторы  
М.Б.Бурзин  
Т.С.Клювиткина  
Е.В.Сидорова  
Н.В.Ульянова  
О.И.Шутова

Литературный редактор  
Е.Е.Жукова

Заведующая редакцией  
И.Ф.Александрова

Перевод содержания  
Т.А.Кузнецова

Графика, верстка:  
С.В.Усков

Подписной индекс: 70707  
Дата выхода в свет: 28.08.2019  
Формат 60×88 1/8. Цифровая печать  
Усл. печ. л. 10.0. Уч. изд. л. 10.2  
Бум. л. 5.0  
Тираж 1000 экз.  
Цена свободная  
Заказ 35  
Редакция и издатель: ФГУП «Издательство «Наука»  
Адрес: 117997, Москва, ул.Профсоюзная, 90  
По вопросам публикации материалов:  
тел.: (495) 276-77-35 (доб. 4171),  
e-mail: [priroda@naukaran.com](mailto:priroda@naukaran.com)  
По вопросам сотрудничества:  
тел.: (495) 276-77-35 (доб. 4301 или 4291),  
e-mail: [journals@naukaran.com](mailto:journals@naukaran.com)  
Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука»  
Адрес: 121099, Москва, Шубинский пер., 6.

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом Совета министров СССР по печати 13 декабря 1990 г.

Свидетельства о регистрации №1202 и ПИ №1202.

Все права защищены. Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Ответственность за точность и содержание рекламных материалов несут рекламодатели.

12+

# НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ ЖУРНАЛЫ ТЕПЕРЬ ДОСТУПНЫ ВСЕМ



## Уважаемые коллеги!

Открыта подписка для физических лиц  
на номера 2019 г. научно-популярных журналов  
«Земля и Вселенная», «Природа»,  
«Энергия: экономика, техника, экология»

### **Журнал «Земля и Вселенная»**

Стоимость годового комплекта (6 номеров) 1200 руб.  
Стоимость полугодового комплекта (3 номера) 750 руб.  
Стоимость 1 номера 400 руб.

#### **Редакция журнала**

Тел.: +7(495)276-77-35 (доб. 42-31)  
E-mail: zevs@naukaran.com  
ул. Профсоюзная, 90, к. 423

### **Журнал «Природа»**

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3000 руб.  
Стоимость полугодового комплекта (6 номеров) 1800 руб.  
Стоимость 1 номера 500 руб.

#### **Редакция журнала**

Тел.: +7(495)276-77-35 (доб. 41-71)  
E-mail: priroda@naukaran.com  
ул. Профсоюзная, 90, к. 416

### **Журнал «Энергия: экономика, техника, экология»**

Стоимость полугодового комплекта (6 номеров) 1500 руб.  
Стоимость 1 номера 500 руб.

#### **Редакция журнала**

Тел.: +7(495) 362-57-66  
E-mail: energy@iht.mpei.ac.ru  
ул. Красноказарменная, 17а



# 40% НА КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»

акция распространяется  
в сети магазинов «Академкнига»  
и в интернет-магазине [naukabooks.ru](http://naukabooks.ru)

## BOOK SALE

# ЕЩЁ БОЛЬШЕ КНИГ И БОЛЬШЕ СКИДОК

Реклама

акция распространяется  
в интернет-магазине [naukabooks.ru](http://naukabooks.ru)

