

Познавательный журнал для хороших людей

НАУКА

из первых рук

www.scfh.ru

3⁽⁶⁹⁾
● 2016

ТЕЛОМЕРЫ:
ЗАГАДКАМ
НЕТ КОНЦА

«ЭКСТРЕМИСТЫ»
БАЙКАЛА

ЕСТЬ ТАКАЯ
ПРОФЕССИЯ -
МЕТАН ОКИСЛЯТЬ

ЧЕЛОВЕК
ИЗ БУДУЩЕГО

ВЕНЕРА КАК ВОЗМОЖНОЕ будущее ЗЕМЛИ





Валентин Коптюг – студент Московского химико-технологического института им. Д. И. Менделеева

Двадцать лет назад, в октябре 1996 г. ЮНЕСКО приняло решение о включении в список объектов Всемирного природного наследия озера Байкал, который стал одной из первых особо охраняемых природных территорий международного значения в России. Вопрос о придании озеру Байкал мирового статуса был впервые поднят на Консультативном совете ООН по устойчивому развитию (1994 г.) академиком Валентином Афанасьевичем Коптюгом, который в то время возглавлял Сибирское отделение АН СССР и пользовался международным признанием как один из наиболее компетентных российских специалистов по вопросам устойчивого развития человеческого сообщества и охране окружающей среды.

9 июня 2016 г. академику Валентину Афанасьевичу Коптюгу исполнилось бы 85 лет...

На первой странице обложки:

*Извержение супервулкана.
Рисунок И. Кулакова, бумага, акварель*

на стр. 20

*Снимки Земли
и Венеры.
Credit: NASA*

на стр. 30

на стр. 46

3. 2016
научно-популярный журнал



НАУКА

из первых рук



В НОМЕРЕ:

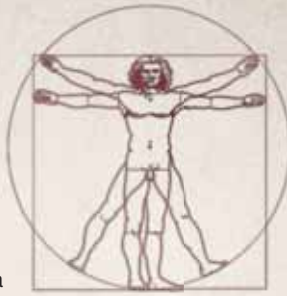
К 90-летию академика Д. Г. Кнорре: «Я знаю, что когда в очередной раз приду в институт в воскресенье, то, как обычно, встречу там Дмитрия Георгиевича» (чл.-кор. О. И. Лаврик)

Исследование супервулкана Тоба на о. Суматра с помощью сейсмической томографии показало, что причиной крупнейших в истории Земли извержений была глубинная миграция воды

Что такое теломеры – «защитные колпачки» на концах хромосом, не позволяющие им слипаться друг с другом, или хронометры, отсчитывающие время жизни?

Открытие способности микроорганизмов осадочной толщи Байкала синтезировать углеводород ретен, ранее считавшийся индикатором исключительно хвойных растений, расширило список биомаркеров «молодой» байкальской нефти

Познавательный журнал
для хороших людей



Редакционная коллегия

главный редактор
акад. Н. Л. Добрецов

заместитель главного редактора
чл.-кор. В. И. Бухтияров

заместитель главного редактора
акад. В. В. Власов

заместитель главного редактора
чл.-кор. Н. В. Полосьмак

заместитель главного редактора
акад. В. Ф. Шабанов

ответственный секретарь
Л. М. Панфилова

акад. И. В. Бычков

акад. М. А. Грачев

акад. А. П. Деревянко

чл.-кор. А. В. Латышев

к. ф.-м. н. Н. Г. Никулин

акад. В. Н. Пармон

акад. Н. П. Похиленко

д. ф.-м. н. М. П. Федорук

акад. М. И. Эпов

Редакционный совет

акад. Л. И. Афтanas

чл.-кор. Б. В. Базаров

чл.-кор. Е. Г. Бережко

акад. В. В. Болдырев

акад. А. Г. Дегерменджи

проф. Э. Краузе (Германия)

акад. Н. А. Колчанов

акад. А. Э. Конторович

акад. М. И. Кузьмин

акад. Г. Н. Кулипанов

д. ф.-м. н. С. С. Кутателадзе

проф. Я. Липковски (Польша)

акад. Н. З. Ляхов

акад. В. И. Молодин

д. б. н. М. П. Мошкин

чл.-кор. С. В. Нетесов

д. х. н. А. К. Петров

проф. В. Сойфер (США)

чл.-кор. А. М. Федотов

д. ф.-м. н. М. В. Фокин

д. т. н. А. М. Харитонов

акад. А. М. Шалагин

акад. В. К. Шумный

д. и. н. А. Х. Элерт

Над номером работали

к. б. н. Л. Овчинникова
Л. Панфилова
М. Перепечаева
Е. Сычева
А. Харкевич
А. Владимирова
А. Мистрюков

«Естественное желание хороших
людей – добывать знание»

Леонардо да Винчи

Периодический научно-популярный журнал

Издается с января 2004 года

Периодичность: 6 номеров в год

Учредители:

Сибирское отделение Российской
академии наук (СО РАН)

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН

Институт археологии и этнографии
СО РАН

Лимнологический институт СО РАН

Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН

Институт химической биологии
и фундаментальной медицины СО РАН

Институт нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
ООО «ИНФОЛИО»

Издатель: ООО «ИНФОЛИО»

Адрес редакции и издателя:
630090, Новосибирск,
ул. Золотодолинская, 11
Тел.: +7 (383) 330-27-22, 330-21-77
Факс: +7 (383) 330-26-67
e-mail: zakaz@info-press.ru
e-mail: editor@info-press.ru

www.scfh.ru

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)

Свидетельство ПИ № ФС77-37577
от 25 сентября 2009 г.

ISSN 1810-3960

Тираж 1 000 экз.

Отпечатано в типографии
ООО «ИД „Вояж“» (Новосибирск)

Дата выхода в свет 08.08.2016

Свободная цена

Перепечатка материалов только
с письменного разрешения редакции

© Сибирское отделение РАН, 2016

© ООО «ИНФОЛИО», 2016

© Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, 2016

© Институт археологии и этнографии
СО РАН, 2016

© Лимнологический институт СО РАН,
2016

© Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН, 2016

© Институт химической биологии
и фундаментальной медицины
СО РАН, 2016

© Институт нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука
СО РАН, 2016

Дорогие друзья!

В сказках о живой воде и поисках философского камня отразилась давняя мечта человечества об универсальном лекарстве, действующем на первопричину любой болезни без вреда для организма. После открытия материальных носителей наследственности в середине прошлого века стало ясно, что мишенью таких лекарств могут быть гены – либо патогенных микроорганизмов, либо наши собственные, к примеру, онкогены в раковых клетках. Для того чтобы воздействовать на определенный ген, молекула вещества должна каким-то образом распознать его нуклеотидную последовательность – задача, на первый взгляд, неразрешимая. Но группа химиков, приехавших в новосибирский Академгородок в первые годы его создания, считала иначе. На основе принципа молекулярного узнавания, используемого самой природой, они сформулировали идею направленного воздействия на гены с помощью олигонуклеотидов – фрагментов нуклеиновых кислот, «вооруженных» специальными химическими группами. Первую работу по олигонуклеотидам сибирские химики опубликовали в 1967 г. – именно эта дата и считается сегодня официальной датой возникновения нового направления в молекулярной биологии и фармакологии.

«Отцом» этого направления в биологии и фармакологии стал Д. Г. Кнорре, директор-организатор Новосибирского института биоорганической химии СО РАН, основатель кафедры молекулярной биологии Новосибирского государственного университета (1975); создатель научной школы, ведущей исследования на стыке медицины и биологии, о которых мы не раз писали в нашем журнале. В этом году академик Кнорре отмечает свое 90-летие, но активности и работоспособности ученого можно позавидовать. Он до сих пор ведет все ученые и диссертационные советы в Институте химической биологии и фундаментальной медицины, а на его рабочем столе лежат черновики «Физиологической биохимии» – продолжения серии учебников, по которым учились многие поколения студентов и аспирантов.

В рубрике «Вселенная» читатель найдет аргументы в пользу необычного сценария, по которому наша планета через 1,5 млрд лет превратится во вторую Венеру, где условия, приемлемые для жизни, сегодня существуют лишь в узком облачном слое атмосферы на высоте около 50 км от поверхности. Причиной такой катастрофической эволюционной трансформации может стать

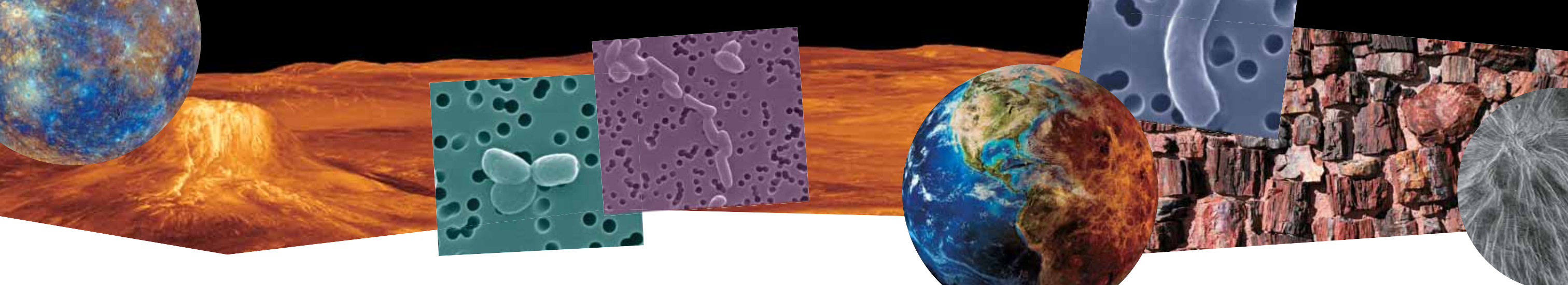


превращение нашего Солнца в красного гиганта и рост солнечной инсоляции. Когда средняя температура поверхности превысит 40 °С, все высшие формы жизни на Земле погибнут, и люди смогут наблюдать закат земной биосферы, только если они переселятся на другие планеты.

Условия, в чем-то близкие к «венерианским», можно встретить на Земле уже сегодня. Речь идет о так называемой «глубинной биосфере» – микробных сообществах в толще морских осадков, живущих при почти полном отсутствии кислорода и в условиях высоких температур и давления. В зонах повышенной тектонической активности, каковой и является озеро Байкал, глубинная биосфера «соприкасается» с поверхностной, так как восходящие потоки газов и флюидов увлекают за собой и обитателей глубин. В новом выпуске мы продолжаем рассказ о жизни обитателей озера Байкал. Среди байкальских термофильных микроорганизмов уже найдены уникальные бактерии, производящие типичный биомаркер хвойных (!) деревьев, а также некультивируемые клоны, о путях метаболизма которых пока можно только гадать.

Хочу добавить, что нынешними успехами молодые исследователи во многом обязаны тому факту, что в свое время отцы-основатели Сибирского отделения РАН увидели эффективность мультидисциплинарного подхода в решении задач. Сегодня он базируется на самых современных физико-химических и молекулярных методах и приносит удивительные и часто неожиданные плоды.

Академик Н. Л. Добрецов,
главный редактор



Превращение **СОЛНЦА** в **КРАСНОГО ГИГАНТА** **НЕУЗНАВАЕМО ИЗМЕНИТ** атмосферу **ЗЕМЛИ**: она станет такой же плотной, горячей и насыщенной углекислым газом, как на **ВЕНЕРЕ**. **С. 30**

Неожиданным ответом на вопрос о перспективах создания принципиально **НОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ** элементарных частиц может стать **ТРИЗ** – рационализаторская методология, изобретенная **В СССР** для использования **В ИНЖЕНЕРИИ**. **С. 24**

.01

ИСТОРИЯ НАУКИ. СУДЬБЫ

6 Рецепт «второго дыхания» от академика Кнорре

.02

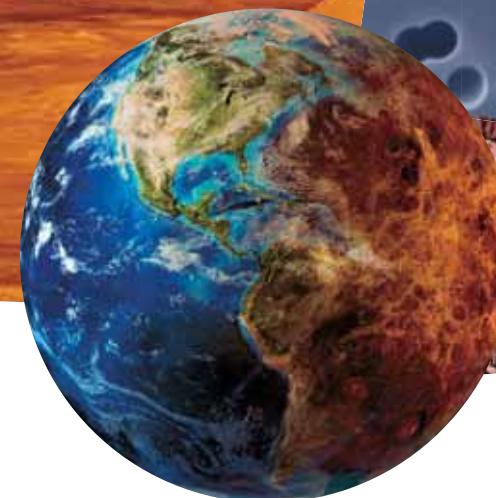
НОВОСТИ НАУКИ

- 20 **И. Ю. Кулаков**
Причиной извержений супервулканов оказалась обыкновенная вода
- 24 **А. А. Серый**
Ускоритель будущего: как вернуть экспоненциальный рост графику Ливингстона?

.03

ВСЕЛЕННАЯ

30 **Н. Л. Добрецов, Е. В. Кукарина**
Венера как возможное будущее Земли



Академик В. А. Коптюг: «**БАЙКАЛ** — уникальное озеро с огромным объемом воды и огромной инерционностью, и потому здесь особенно недопустим **НИКАКОЙ РИСК**». **С. 46**

В местах выхода **НЕФТИ И МЕТАНА** на дне Байкала обнаруживаются микроскопические «**ПРИШЕЛЬЦЫ**» из многокилометровой толщи озерных отложений, приспособленные к жизни в «**НЕЗЕМНЫХ**» **БЕСКИСЛОРОДНЫХ** условиях при **ВЫСОКИХ** температурах и давлении. **С. 50**

.04

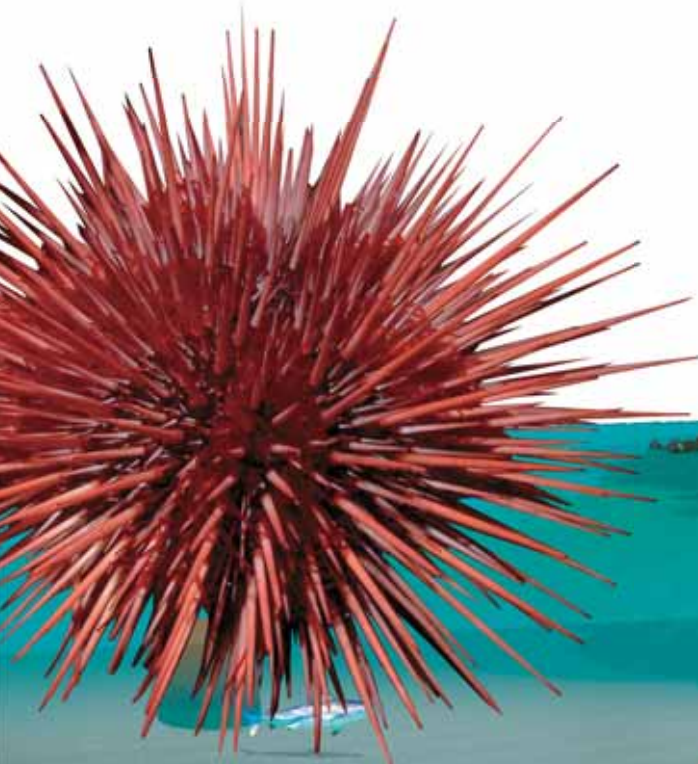
БАЙКАЛ КАК ПРИРОДНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

- 46 Человек из будущего.
К юбилею академика В. А. Коптюга
- 50 **О. Н. Павлова, С. В. Букин**
«Пришельцы» Байкала
- 56 **О. В. Шубенкова, А. С. Захаренко**
Есть такая профессия – метан окислять
- 62 **А. В. Натяганова**
О хромосомных «судьбах» обитателей Байкала»
- 72 **А. Г. Королева**
Структура и длина теломер: загадкам нет конца

.05

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ЭКСПЕДИЦИЙ

84 **В. В. Власов**
В окаменевших лесах Аризоны





ИИОТ
в. Д. Г. Кнорре

Академия наук Союза Советских Социалистических Республик

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ПРЕЗИДИУМ

ПОСТАНОВЛЕНИЕ

07.03.84

г. Новосибирск

№ 120

директоре Новосибирского
института биоорганической
химии СО АН СССР

Президиум Сибирского отделения Академии наук СССР
А Н О В Л Я Е Т :

1. Назначить академика Кнорре Дмитрия Георгиевича директо-
ром Новосибирского института биоорганической химии СО АН СССР
последующим избранием в соответствии с § 12 Устава СО АН СССР.
2. Просить Президиум Академии наук СССР утвердить настоящее
постановление.

И. И. Председатель Отделения
Академик

В. А. Коптыг

И. С. главный ученый секретаря
Отделения д. х. н.

Ю. Д. Цветков

Встретить свое 90-летие в прекрасной творческой форме – мечта любого человека. Но это самое малое из того, что сделал за свою жизнь академик Дмитрий Георгиевич Кнорре.

Для сегодняшних студентов и аспирантов Кнорре – это живая легенда, «человек-учебник», автор выдержавших не одно издание бестселлеров по физической и биологической химии, по которым училось несколько поколений научной молодежи. Для коллег и учеников – руководитель и учитель, знающий, как в условиях жесткой дисциплины предоставить своим подопечным неограниченную творческую свободу. Для отечественной и мировой науки – основатель молекулярной биологии и биоорганической химии за Уралом и научной школы, в которой родилось революционное направление – комплементарно-адресованная модификация нуклеиновых кислот.

Кстати, когда Дмитрий Георгиевич приехал из столицы в строящийся Академгородок, чтобы принять руководство своей первой лабораторией, ему не исполнилось и 35 лет, т. е. он был совсем молодым ученым, которому по современным меркам необходимо создавать условия для личностного научного роста. Как мы знаем, с задачей создания «условий» Кнорре справился самостоятельно и блестяще, создав сначала отдел, а потом и Институт биоорганической химии, где он мог реализовать свою мечту «поверить биологию химией».

Отдавая должное научным достижениям, званиям и наградам академика Кнорре, сегодня мы решили дать слово тем, кто все эти годы делил с ним трудности, успехи и открытия – его ученикам, коллегам и друзьям



ИСТОРИИ
нашей ЛАБОРАТОРИИ
выпуск I



РЕЦЕПТ «ВТОРОГО ДЫХАНИЯ» от академика КНОРРЕ





Валентин Викторович Власов, академик РАН, доктор химических наук, директор Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (ИХБФМ СО РАН, Новосибирск), заведующий кафедрой молекулярной биологии факультета естественных наук Новосибирского государственного университета

«За ним – будущее»

В команду Дмитрия Георгиевича Кнорре я попал третьекурсником НГУ «по наводке» товарища по общежитию, пятикурсника – спортсмена и прагматика. Как известно, на третьем курсе студенты университета должны определиться, где делать диплом. Как правило, они либо советуются со старшекурсниками, либо ходят по институтам и выбирают. Ну мы и пошли: в одном – скучно, в другом – тоже невесело, в «неорганике» с ее взрывами – интересно, но не совсем то, что хочется. Так ничего и не выбрав, мы вернулись в общежитие, где и получили судьбоносный совет от старшего товарища: «Знаете, ребята, сам я в науку не пойду, лучше – на оловозавод, но вы-то наукой хотите заниматься, поэтому идите к Кнорре! Он настоящий ученый, он начал молекулярно-биологические исследования, это здорово – за ним будущее».

Пришли мы втроем к Кнорре, говорим: «Давайте нам халаты! Мы готовы помогать ученым, мы хотим заниматься биологией». А он нам в ответ: «Нет, ребята, не будете вы здесь просто посуду для ученых мыть, и биологии вам пока тоже не будет. Вы – химики, и вот вам химическая работа, каждому – конкретный проект, а когда закончите университет и получите свои

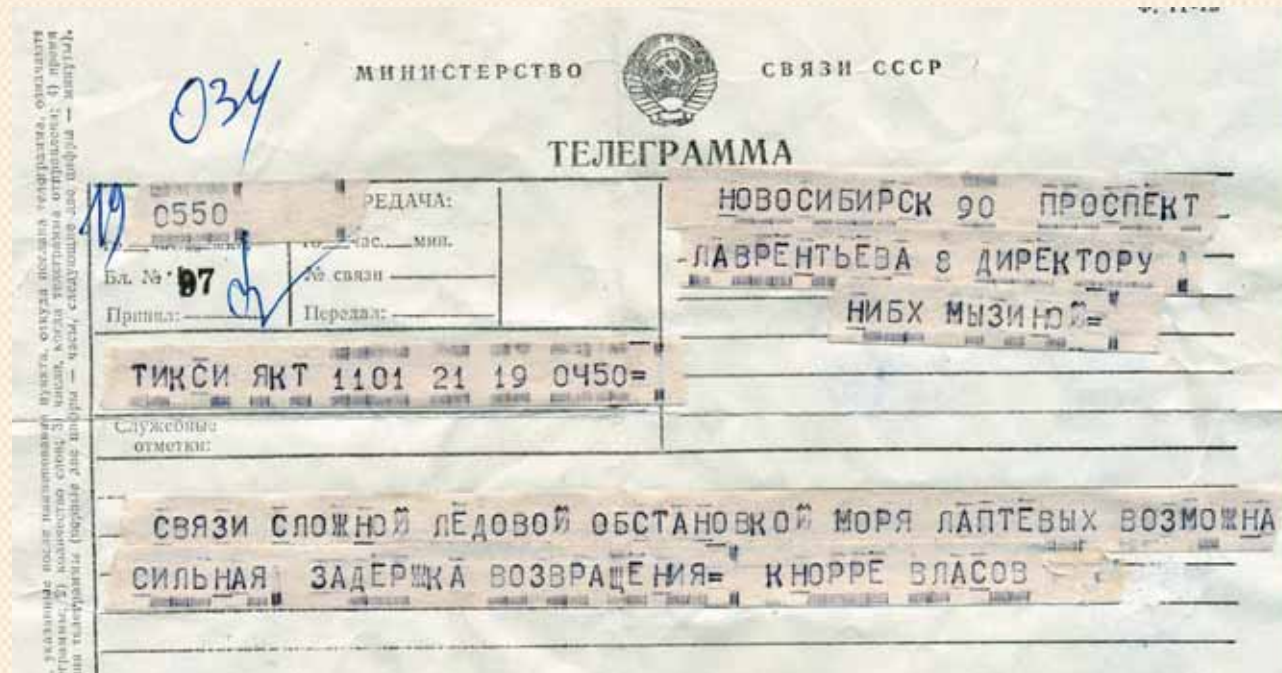
Рецепт «второго дыхания» от академика Кнорре: когда хочешь сильно спать, завариваешь и выпиваешь стакан крепкого чая, ложишься и через 15 минут просыпаешься, полный бодрости

химические дипломы, тогда и займетесь своей любимой биологией. Выбор ваш как химиков – правильный, наша задача – двигаться от химии в сторону биологии и дальше – к медицине, и работать не с дрозофилой, а с человеком». В результате Кнорре отправил меня в самую сильную химическую группу, которая в то время как раз делала первые шаги в создании ген-направленных препаратов.

Через неделю вызвал к себе и подробно расспросил о моих занятиях в этой группе. Сразу пресек все попытки работы «на подхвате» и дал совершенно самостоятельное задание. Его единственным требованием было – вести журнал. Сказал, что если мы Вас выгоним через год, у нас хоть что-то останется. Работу эту я сделал, получил нужные данные для характеристики новых реагентов, которыми модифицировали нуклеиновые кислоты. Мы опубликовали статью (этот студенческий результат, кстати, и сейчас актуален, им много лет пользовались наши химики).

Сила Кнорре не только в том, что он получил хорошую научную подготовку и стал великим ученым, а в том, что он умеет учить. Он сумел собрать выдающуюся команду: на нашем пяточке все кипело, каждый день рождались новые идеи. Его яркая личность притягивала к себе подобных. Фактически именно под его руководством были подготовлены кадры молекулярных биологов для всей Сибири. В его первой лаборатории химии природных полимеров работали будущий член-корреспондент РАН Ольга Лаврик; С. В. Кузьмин – гениальный конструктор, который придумал жидкостный хроматограф «Милихром» и много других научных инструментов; будущий академик М. А. Грачев – инициатор многих важных проектов, прославивших Сибирское отделение РАН; практически все будущее руководство «Вектора» – Л. С. Сандахчиев, Э. Г. Мальгин, С. В. Нетесов, и многие, многие другие. По словам М. А. Грачева, ставшего впоследствии директором Лимнологического института СО РАН, он решил принять предложение Кнорре поехать в Сибирь, как только увидел его теннисные тапочки, в которых тот приехал «покорять» столицу.

В то время о таких понятиях, как молекулярная биология и биотехнологии, даже не слышали. Когда в Сибири, буквально на пустом месте, стали строить новосибирский Академгородок, в нем сначала появились институты физического и химического направления. Дмитрий Георгиевич, тогда молодой столичный ученый-физхимик, приехал сюда со стремлением заняться



совершенно новым направлением в науке – молекулярной биологией. В результате он создал первый институт этого профиля за Уралом – Новосибирский институт биорганической химии, которому в то время по потенциалу не было равных. За 17 лет на посту декана факультета естественных наук НГУ он полностью перестроил систему обучения студентов и создал базу для подготовки специалистов высшей квалификации, работающих на стыке химии, биологии и медицины. В этом смысле Кнорре без преувеличения можно назвать отцом молекулярной биологии в Сибири.

Среди результатов мирового уровня, которые были получены сначала в лаборатории, а потом в институте Кнорре, – ген-направленные вещества на основе олигонуклеотидов, за которые их авторы в 1990 г. получили Ленинскую премию. Команда Кнорре создала жидкостные хроматографы, синтезаторы генов; в короткие сроки наладила производство радиоизотопов для всего Советского Союза. Здесь выполнены первые отечественные работы по расшифровке геномов (секвенирован геном вируса клещевого энцефалита) и разработаны первые диагностикумы, основанные на гибридизации нуклеиновых кислот.

Один из секретов Дмитрия Георгиевича – колоссальное трудолюбие. Много работали и его сотрудники. Говорили, что, когда едешь ночью по Академгородку, все окна – черные, а в его институте всегда горит свет. Работали по ночам, и понедельник действительно начинался в субботу. Сам он также работал с утра до ночи и успевал все – у него по жизни все было четко расписано, вплоть до изучения европейских языков, которых он освоил немало.

На что он никогда не жалел времени – это на походы. Горный турист, мастер спорта, он обошел всю страну и покорил немало вершин. Несколько раз в год он предпринимал большие путешествия, а практически каждое воскресенье – ближние походы. И это были не просто

молчаливые «шагания»: в ходе таких однодневных походов рождалась масса идей и новых проектов. Основной академический состав обычно сопровождал Дмитрия Георгиевича в этих походах, и всегда они брали с собой тех, кто «поменьше разумом» – студентов, аспирантов.

Дмитрий Георгиевич до сих пор мне очень много помогает как директору, я за ним – как за каменной стеной. Он бесценно ведет все ученые и диссертационные советы. И главное, он сохранил очень легкий, счастливый характер. Он всему радуется: закончили писать статью – ура! Отправили статью в журнал – опять ура! Статью приняли – фантастика, вышла – банкет! Он умеет получать удовольствие от жизни и радоваться не только своим, но и чужим успехам.





Ольга Ивановна Лаврик, член-корреспондент РАН, профессор, доктор химических наук, заведующая лабораторией биоорганической химии ферментов ИХБФМ СО РАН. Лауреат Государственной премии СССР (1984)

«Будут трудности, но будут и открытия»

У Дмитрия Георгиевича был такой обычай: всех новых студентов, аспирантов, которые ему нравились, приглашать с собой в поход. Так началось и наше знакомство, когда я на третьем курсе пришла в его лабораторию на практику. Мы отправились на знаменитую Белуху – одну из крупнейших горных вершин России и высшую точку Алтайских гор. Это был первый в моей жизни туристский поход, он показался мне очень длинным и тяжелым: тащили рюкзаки по 30 кг, но еды все равно не хватило – даже пришлось поголодать, пока не дошли до селы. Но главное, мы сбились с маршрута и в результате открыли на высоте 3125 м над уровнем моря совершенно новый перевал через Катунский хребет – Кони-Айры.

После этого похода были и другие. К походам наш руководитель готовился очень тщательно, а в походах не давал расслабляться: все было четко – привал «по часам» через каждые 40 минут, и неважно, в каком месте – лес ли, болото.

Такие черты Кнорре, как организованность, требовательность и настойчивость в достижении цели, ярко проявившиеся в этих походах, потом мы постоянно наблюдали и в работе с ним. Уже после первого нашего

похода на Белуху я поняла, что с Дмитрием Георгиевичем будет непросто, предстоит решать трудные задачи, преодолевать препятствия, но зато будут и открытия. Так оно и вышло.

Поступив в аспирантуру, я продолжила работу в созданной Дмитрием Георгиевичем лаборатории химии природных полимеров – она занимала подвальное помещение в Институте органической химии, а сам он стал моим научным руководителем. Коллектив, в который мне посчастливилось, – именно посчастливилось! – попасть, был, без преувеличения, звездным. Это были специалисты высочайшей квалификации, выпускники столичных вузов, в основном Московского химико-технологического института им. Д. И. Менделеева (Лев Сандахчиев и Александр Гиршович), МГУ (Михаил Грачев) и др. Кроме Кнорре, у меня появились еще несколько руководителей, так что я ощущала себя настоящей «дочерью полка». А главное, меня окружала просто потрясающая творческая атмосфера. Работали в удивительном темпе, все помогали всем. Просыпаясь утром, я чувствовала себя счастливой уже только от того, что снова пойду на работу...

Мои коллеги очень многому меня научили, хотя все экспериментальные данные принимал очень требовательный руководитель, который старался всем нам привить физико-химическое мышление – учил количественно осмысливать биологические процессы. Основная черта школы Кнорре как раз и заключается в хорошем знании химии вместе с четким пониманием количественных химико-физических аспектов молекулярной биологии. Это и есть та основа, на которой мы



Д. Г. Кнорре в походе (1960-е – начало 1970-х гг.)



Д. Г. Кнорре в лаборатории (конец 1970-х – начало 1980-х гг.). Слева направо сидят: Татьяна Годовикова, Д. Г. Кнорре, Валентина Бунева, Наталья Пичко; стоят слева направо: Ирина Петрусева (Пача), Наталья Кудряшова





Ольга Лаврик, аспирантка НГУ

стоим до сих пор. В НГУ Дмитрий Георгиевич читал курс ферментативного катализа, который позволяет оценивать такие взаимодействия. Позже он «передал» его мне. Этот курс имел для него большое значение, и то что Дмитрий Георгиевич доверил его мне, совсем еще «зеленой» аспирантке, было огромной ответственностью. Сначала я вела семинары вслед за его лекциями, – так Дмитрий Георгиевич меня тренировал.

В конце 1970-х гг. из отдела биохимии Кнорре начал формироваться Новосибирский институт биоорганической химии, официально созданный в апреле 1984 г. Заведующими лабораториями в новом институте стали сотрудники лаборатории Кнорре, в том числе представители «младшего поколения», которые к этому времени в быстром темпе защитили докторские диссертации: В. В. Власов, М. А. Грачев, В. Ф. Зарытова, и я в их числе. Многие «старшие ученики» Кнорре – Л. С. Сандахчиев, Э. Г. Малыгин, С. К. Василенко – ушли в новый Всероссийский научно-исследовательский институт молекулярной биологии, на базе которого был создан НПО «Вектор». Так что Кнорре в неко-

Благодарим РНФ за поддержку исследований (грант 14-24-00038)

торой степени был и «отцом» этого крупнейшего вирусологического и биотехнологического центра России.

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. Дмитрий Георгиевич стал резко и настойчиво менять направление исследований института. Российские ученые в то время надеялись принять участие в программе «Геном человека», и внимание переключилось с бактериальных молекулярных систем, которыми мы занимались, на «человеческие». Так мы стали заниматься вопросами репликации и репарации («ремонт») ДНК человека.

Проводить подобные работы в то время было крайне трудно, так как человеческие гены еще не умели клонировать в бактериальных клетках, и весь необходимый материал приходилось выделять из тканей человеческой плаценты. А так как это были годы перестройки и финансирование практически отсутствовало, тем более для развития нового направления, то условия для научной работы складывались тяжелейшие. Нам помогло то, что именно в это время появилась возможность работать за границей. Кнорре всегда настраивал своих учеников и аспирантов на сотрудничество с другими лабораториями, но это были, как правило, контакты со столичными организациями. Теперь же и я сама, и мои молодые сотрудники поехали осваивать новые методы и системы за границу. Организовать это было непросто, так как все наши связи относились к «старой» тематике, пришлось все начинать «с нуля». Постепенно мы стали получать совместные гранты на эту новую тематику, и все новые методы и системы переносить в нашу «домашнюю» лабораторию. И хотя это был очень трудный период нашей жизни, оглядываясь назад, думаю, что стратегически все было сделано правильно.

В результате в 1990-е гг. институту под руководством Д. Г. Кнорре удалось начать в Сибири совершенно новое, очень важное направление молекулярной биологии – энзимологию матричных систем, изучающую комплексы ферментов вплоть до сложнейших систем репарации ДНК. Сейчас этим направлением успешно занимаются три лаборатории нашего института, которыми руководят ученики и ученики учеников Кнорре. Могу сказать, что в России другого такого центра по изучению репарации нет. Наши исследования в этой области поддерживаются грантами Российского научного фонда и Министерством образования и науки в рамках, созданных при Новосибирском государственном университете по программе ТОП-100 совместных лабораторий. Дмитрий Георгиевич и сейчас живо интересуется этими работами, и мы посвятили ему новую книгу «Репарация ДНК», которая выйдет после его юбилея.

Интересно, что эта тематика, в отличие от создания ген-направленных веществ на основе олигонуклеотидов, начиналась как фундаментальная. Дмитрий Георгиевич всегда считал, что открытия, которые по-настоящему меняют жизнь человека, рождаются только в фундаментальных исследованиях. И действительно, при изучении систем репарации нам удалось найти мишени для лекарств, которые подавляют рост опухолевых клеток. Совместно с отделом под руководством д.х.н. Н. Ф. Салахутдинова Института органической химии СО РАН был создан ряд потенциальных антираковых препаратов, которые уже проходят доклинические испытания. Наша цель – создать эффективные лекарства, которые были бы нацелены как на основную опухоль, так и на метастазы, так как известно, что именно в них системы репарации ДНК наиболее активны.

И это яркий пример того, как глубокие фундаментальные исследования могут иметь далеко идущие прикладные последствия. Если вспомнить, как открыли пенициллин, то в этом нет ничего удивительного – многие подобные открытия совершаются случайно. Поэтому финансирование фундаментальных исследований является очень важным и приоритетным именно для последующих практических применений. Озарение может прийти в любой момент, но только тому, кто постоянно думает над задачей. Эту идеологию нам привили еще в университете, и мы были уверены, что жить в науке – самое главное и интересное занятие на свете. А такие люди, как Д. Г. Кнорре, служили нам в этом примером. С ним можно было обсудить свою работу в любой момент: днем, вечером, в выходные – его дверь всегда была открыта.

Вообще приходиться на работу в выходные дни в лаборатории Кнорре считалось хорошим тоном. Я и сейчас продолжаю эту традицию и знаю, что когда в очередной раз приду в институт в воскресенье, то, как обычно, встречу там Дмитрия Георгиевича. Иногда встречаю там и своих молодых сотрудников, чему откровенно радуюсь, – значит, человек здесь счастлив, нашел то, что его увлекло. Но все же, когда я покидаю рабочее место в десять вечера, компанию мне обычно составляет лишь старшее поколение. Боюсь, что дальше эту «трудолюбивую» традицию мы не передадим. И идей у сегодняшней молодежи заметно меньше. Дело даже не в том, что многие талантливые сотрудники уехали за границу, – там тоже на смену пришло другое поко-

Сотрудницы лаборатории Д. Г. Кнорре:
Наталья Мензорова, Ольга Лаврик, Нина Комарова



Нина Ивановна Гринева,
автор первой работы,
посвященной антисмысловым
олигонуклеотидным технологиям,
опубликованной в 1967 г.
в соавторстве с А. М. Беликовой
и В. Ф. Зарытовой

ление, с меньшей долей «романтики» по отношению к научным исследованиям.

В этом смысле Дмитрий Георгиевич Кнорре был и остается романтиком и рыцарем науки. Он не использовал науку в корыстных целях – научный интерес для него всегда был главным. Да, он был директором, но никогда не был функционером, которых на подобных постах – немало, в первую очередь он всегда оставался ученым. Когда же он перестал быть директором, нам открылись многие его черты, которых раньше мы не замечали. Оказалось, что это добрый, с мягким характером человек. Все ученики школы Кнорре испытывают к нему теплые чувства. Мы поняли, что он вовсе не был кремнем, каким казался, но положение обязывало, и он старался. И сейчас у нас с ним такие хорошие отношения, о которых я раньше могла только мечтать.

Кстати сказать, Дмитрий Георгиевич всегда любил работать с женщинами. Они были для него опорой и источником вдохновения. И сегодня половина заведующих лабораториями института – женщины. Вообще область науки, которой мы занимаемся, на мой взгляд, очень подходит для «прекрасной половины» человечества. Она одновременно точная и какая-то «человечно-гуманитарная». Для рождения идей здесь нужен не сухой расчет, а живое воображение. Нужно искать неожиданные связи, выдвигать фантастические гипотезы.

ИСТ
нашей ЛА
выпус

Михаил Александрович Грачев – академик РАН, доктор химических наук, директор Лимнологического института СО РАН (Иркутск) с 1987 по 2015 г., лауреат Государственной премии СССР (1985), лауреат премии им. А. П. Карпинского (1998)

Рибосомы с кремом

Я познакомился с Дмитрием Георгиевичем Кнорре, когда мне было 24 года. В 1963 г. группа новосибирцев приехала в Москву и рассказала о новом методе выделения «индивидуальной» валиновой тРНК. Этой темой занимались два московских института – Институт радиационной и физико-химической биологии и Институт химии природных соединений, где я тогда работал старшим лаборантом. Новый метод, совершенно оригинальный, придумал сотрудник Дмитрия Георгиевича Лева Сандахчиев.

Москвичи встретили новосибирцев с обычным московским апломбом, но уже в первый день докладов влюбились в них окончательно и бесповоротно. Со мной же дело закончилось тем, что я оставил московскую квартиру, Большой театр и уехал с семьей в новосибирский Академгородок в 1965 г. Перед этим я несколько раз надолго ездил в Новосибирский институт органической химии в командировки и понял, что именно здесь нужно жить и работать. Длинные белые сверкающие коридоры, в торцевое окно смотрят сосны, в институте есть опытный химический цех (мне и сейчас всегда хочется что-нибудь изготовить в большом масштабе), конструкторское бюро, весь набор мастерских, а в лабораториях – полная демократия.

В последующие сорок лет были и дружба, и конфликты – всякое, но всегда все для пользы дела, хотя эту пользу мы иногда понимали с Д. Г. Кнорре по-разному. Самое же светлое время – это время рибосом. Рибосомы – это фабрики синтеза белка, огромные молекулярные машины, которые тогда были центром притяжения «молекулярщиков» всего мира. Рибосомы тогда представлялись двумя слепленными шариками – большой и малой субъединицами, в щели между которыми протягивалась лента информационной РНК, а в сторону отскакивала транслированная белковая молекула.



Будущие академики
Лев Сандахчиев и Михаил Грачев.
1985 г. Фото А. Полякова
© Фотоархив СО РАН



в которой «в город въехали гусары». Встречи продолжались, наверное, года два. Как нас терпела Лера, не знаю, но «рибосомы» мы ели каждый раз, а потом поздно вечером шли домой по улице Золотодолинской, весной – мимо цветущих яблонь, осенью – мимо красных рябин, зимой – по ослепительно белому в лучах фонарей снегу. И это было счастье.



Георгий Юрьевич Шевелев, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории биомедицинской химии ИХБФМ СО РАН

иногда бывали Оля Лаврик и Лева Сандахчиев, а также Рудольф Иосифович Салганик.

Кнорре повесил школьную доску, и все по очереди изображали на ней мелом свои фантазии об устройстве микромира. Лично меня физики глубоко поразили дисциплиной ума, простотой и ясностью изложения мысли, а не математическими формулами, которые я и тогда не понимал, и сейчас не понимаю. После семинара Валерия Леонидовна Кнорре (супруга Д. Г. Кнорре) приносила на стол собственноручно изготовленные «рибосомы» – круглые нежные изделия, сделанные из теста, в виде надрезанного шарика, наполненного изумительно вкусным кремом. Кажется, их надо было считать профитролями или эклерами, но для нас это были рибосомы.

После чая Кнорре иногда садился за пианино и пел незабываемым голосом туристские песни, чаще всего ту,

Грачев М. А. Рибосомы // Выпускники МГУ в Новосибирском научном центре СО РАН. 1957–2007. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео». 2007. С. 145–146

У меня очень трепетное отношение к этому человеку – и как к ученому, и как к личности. Когда я был студентом, мы учились по его учебникам, а став аспирантом, готовился по ним к сдаче кандидатского минимума.

Сейчас Дмитрий Георгиевич уже не участвует активно в научной работе, поэтому лично мы общались только на защитах диссертаций. Академик Кнорре уже много лет – зам. пред. диссертационного совета, и по тем вопросам, которые он обязательно задает всем соискателям, видно, что он интересуется не только теми областями, которыми сам занимается, – ему интересно все!

Я слышал, что, когда он был моложе, они ходили в походы, где очень хорошо, неформально проводили время. Было, наверное, здорово попасть в эту струю!

Наверное, году в 1968–1969 Кнорре решил у себя дома в коттедже устроить семинар для некоторых сотрудников своей лаборатории и талантливых физиков из Института химической кинетики и горения. Раз в неделю вечером там собиралось 10–12 человек: физики – Юра Молин, Юра Наберухин, Жозеф Беккер, Витя Левинталь и мы, химики, – Саша Гиршович, Валя Зарытова, Тамара Шубина, позднее Валя Власов; кажется,

Л. С. Сандахчиев, Д. Г. Кнорре, В. А. Коптюг. 1985.
Фото В. Новикова.
© Фотоархив СО РАН



ИСТОРИЯ
НАУКИ
ИХБФМ СО РАН
выпуск I

Светлана Дмитриевна Мызина, кандидат химических наук, заместитель директора по научно-образовательной деятельности ИХБФМ СО РАН (Новосибирск)

«Он не поучает, он учит»

Дмитрий Георгиевич Кнорре, которого я знаю более полувека, для меня в первую очередь Учитель. Учитель, чье учительство не заканчивается никогда.

Впервые я увидела его на лекциях по физхимии, сложных и интересных, когда поступила в первом наборе на факультет естественных наук НГУ. В то время там учились все – и математики, и физики, и химики. О молекулярной биологии мы тогда и не помышляли, но я знала, что при Институте органической химии создан отдел химии природных соединений под руководством Кнорре, и очень хотела попасть туда на работу. Когда наконец пришла к Дмитрию Георгиевичу, первое, о чем он спросил, – какие у меня оценки по физике и математике, и лишь, узнав, что оценки хорошие, сказал – приходи.

Сразу после защиты диплома он не просто взял меня на работу, но и отправил «попутно» преподавать в университет. Сказал: «Будешь – и все!». С самого начала отправил вчерашнюю студентку преподавать. Дмитрий Георгиевич был достаточно жестким руководителем, очень требовательным, но в то же время давал колоссальную самостоятельность. Он читал лекции, я вела семинары, но когда я попросила его посмотреть придуманные мной семинарские задачи, сразу отказался, сказав: «Ты преподаешь, ты и придумывай». Это сейчас я могу высказать ему все, что думаю, а тогда не смела,



слушалась его я безоговорочно.

На посту декана ФЕНа НГУ он проработал 17 лет, а я после окончания аспирантуры стала его заместителем. Сам очень хорошо организованный человек, он и среди сотрудников поддерживал четкое разделение труда и непременно два раза в неделю вел прием в деканате. Но были и неформальные «деканатские» сборища, в том числе в коттедже у Дмитрия Георгиевича, где мы обсуждали наши проблемы, новые курсы, выпускали юмористическую газету...

Что касается организации учебы на факультете, то в то время у нас было два отделения – химическое и биологическое. Детищем Д. Г. Кнорре стала не только

кафедра молекулярной биологии, которая появилась в НГУ в 1975 г., но и так называемый «гибридный поток», где по общей усложненной программе вместе учились и химики, и биологи. На это направление был объявлен конкурс, поэтому туда попадали лучшие студенты из двух потоков – будущие специалисты по молекулярной биологии и биохимии с одним из лучших в России уровнем подготовки.

Когда Дмитрий Георгиевич полностью изменил учебный процесс на факультете и ввел физическую химию на первом курсе, то довольно быстро понял, что студенты еще плохо подготовлены, им трудно учиться. Поэтому он сразу же написал с соавторами учебник по физхимии. По этому учебнику, выдержавшему уже несколько изданий и переведенному на английский язык, и сегодня учится вся страна. За ним последовала наша «Биологическая химия», третье издание которой вышло в 2000 г. А сейчас мы с ним пишем ее следующую часть, еще более приближенную «к жизни» – «Физиологическую химию».

Успех этих учебников, наверное, и в том, что Дмитрий Георгиевич всегда хочет «въехать» до конца в любую проблему. Он пишет статьи и обзоры, на научных собраниях всегда задает вопросы, часто образовательного характера. Ему самому до сих пор интересно учиться – это редчайшее качество! Как о человеке, о Дмитрии Георгиевиче могу только добавить, что ничто человеческое ему не чуждо, но насколько он живой, эмоциональный и творческий, действительно необыкновенный человек я узнала, пожалуй, лишь в последние годы, когда мы стали не только учителем и учеником, не только коллегами, но и хорошими друзьями.



Екатерина Сергеевна Ильина, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории биоорганической химии ферментов ИХБФМ СО РАН

Как большинству студентов факультета естественных наук НГУ, имя Д. Г. Кнорре мне впервые встретилось еще в начале первого курса – все наши студенты учатся по учебнику, который он написал в соавторстве с Л. Ф. Крыловой и В. С. Музыкантовым. Позже, также по его учебнику, мы изучали биоорганическую химию.

В этом смысле он для нас «человек и пароход», легенда. А увидела я его впервые уже в Институте химической биологии и медицины, где писала диплом. Он пришел на защиту одного из сотрудников нашей лаборатории, меня удивил уже факт, что такой человек ходит на защиты, но больше всего меня поразило то, какие вопросы он задавал, – очень точные, все по делу. Кстати сказать, так как в начале я сама далеко не все понимала, в полной мере оценить замечания Дмитрия Георгиевича я смогла уже позже – на своей защите, где сама была «ответчиком». Эти диссертационные советы он продолжает вести по сей день, все так же вникая во все детали.

В 2010 г. мне посчастливилось познакомиться с ним ближе в совместной поездке на конференцию. Дмитрий Георгиевич очень много рассказывал о своей учебе, о том, как попал в Новосибирск, вплоть до самых мелочей, – его память меня просто поразила!



Сотрудники лаборатории химии природных полимеров Института органической химии АН СССР: С. Мызина, В. Сиротюк, Н. Теплова, Т. Костякина



Дмитрий Владимирович Пышный, профессор, доктор химических наук, заместитель директора по научной работе ИХБФМ СО РАН

«Не номинальный директор»

Я пришел в институт лаборантом в 1991 г., когда Дмитрий Георгиевич Кнорре еще был директором созданного им Новосибирского института биоорганической химии, и видел, как серьезно он относился к своей работе. Это был не номинальный директор: он разбирался во всем, чем занимались в институте, настолько глубоко, насколько это вообще возможно. При этом он не был ученым «не от мира сего» – нельзя было даже представить, что его можно где-то в чем-то обхитрить. Он лично знал всех сотрудников института, по крайней мере ключевых и тех, кто подавал надежды. Мог просто вызвать без предупреждения целую группу в составе лаборатории к себе в кабинет, чтобы обсудить ее научное направление и полученные результаты, причем очень вьедливо, входя во всех тонкости. Это были очень продолжительные и достаточно жесткие разборы, так что все сотрудники всегда были в тонусе.

Академик Кнорре всегда очень серьезно относился к фундаментальным исследованиям, старался «держать руку на пульсе». По сути, совместно с московскими коллегами он стоял у истоков химии нуклеиновых кислот в России. В некоторой степени он стал и отцом-основателем олигонуклеотидной химии, так как оказал активнейшую поддержку абсолютно новому направлению – комплементарно-адресованной модификации нуклеиновых кислот.

Суть этой глобальной концепции, сформулированной в 1967 г. его сотрудницей Н.И. Гриневой, состояла в создании на основе синтетических олигонуклеотидов (коротких фрагментов ДНК) высокоспецифических препаратов, которые благодаря природному механизму молекулярного «узнавания»



будут целенаправленно воздействовать на конкретный ген. Эта идея намного опередила свое время – первые зарубежные работы появились лишь десятилетие спустя. В разработку таких терапевтических агентов были вложены огромные средства, хотя быстрых результатов получить не удалось из-за множества «сопутствующих» проблем. Тем не менее за последние годы несколько перспективных соединений были допущены к клиническим испытаниям, а два американских препарата разрешены к использованию в медицинской практике.

Кстати сказать, успешное развитие новых направлений в институте базировалось на собственном производстве компонентной базы, которое развивал академик Кнорре. Конечно, это не была автоматизированная линия синтеза олигонуклеотидов, но на базе химического цеха в Институте органической химии был разработан буквально «с нуля» свой метод синтеза, который в свое время был очень востребован. В дальнейшем Дмитрий Георгиевич всячески поддерживал разработку автоматических ДНК-синтезаторов: первые отечественные приборы были выпущены именно в Новосибирске. Постановка олигонуклеотидного синтеза, также как и создание биотехнологической базы по производству различных ферментов, стала еще одним шагом на пути к созданию новых диагностических и терапевтических технологий.



Причиной извержений СУПЕРВУЛКАНОВ оказалась обыкновенная ВОДА

Новосибирские ученые в сотрудничестве с коллегами из Франции и Саудовской Аравии на основе комплексного геофизического исследования глубинного строения под кальдерой Тоба на о-ве Суматра реконструировали механизмы процессов, приводящих к повторяющимся в этом районе суперизвержениям. Результаты этой работы опубликованы в престижном журнале *Nature Communications*

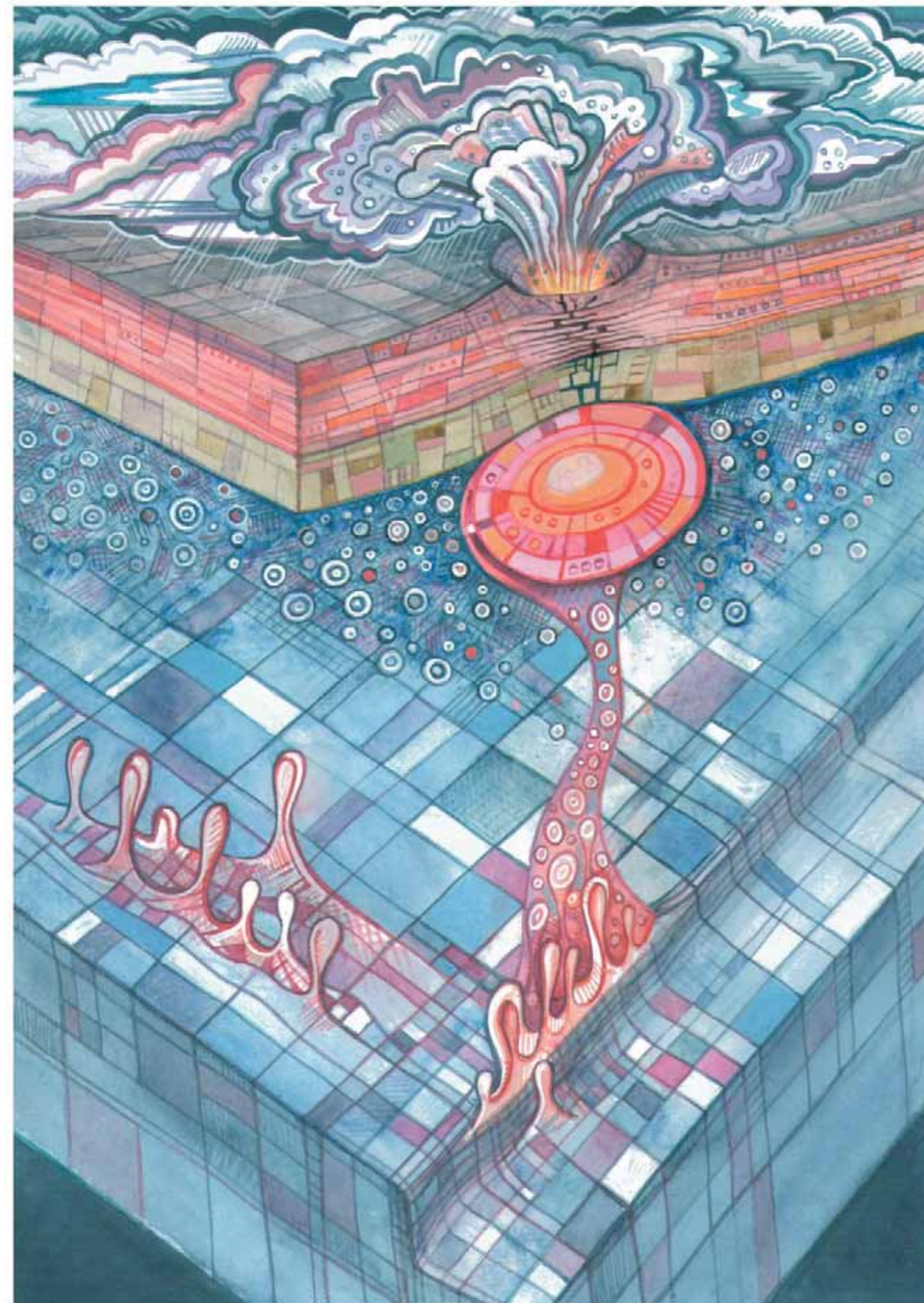


КУЛАКОВ Иван Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 70 научных работ

Основной причиной суперизвержений является накопление в недрах Земли воды, которая, как это ни парадоксально, является наиболее взрывоопасным веществом.
Рисунок И. Кулакова, бумага, акварель

Ключевые слова: супервулканы, Тоба, Суматра, Индонезия, сейсмическая модель, тектоника, субдукция, вулканизм, кальдера, строение коры, магматические очаги, суперизвержения.
Key Words: supervolcanoes, Toba, Sumatra, Indonesia, seismic model, tectonics, subduction, volcanism, caldera, crust structure, magma chambers, supereruptions

© И.Ю. Кулаков, 2016



Суперизвержение – это взрывное вулканическое извержение с единовременным выбросом пород общим объемом более 1000 км³ в условном твердом эквиваленте. В течение последнего миллиона лет на Земле функционировали три супервулкана: Йеллоустон в Северной Америке, Таупо в Новой Зеландии и Тоба на о-ве Суматра. Извержение вулкана Тоба примерно 74 тыс. лет назад, в результате которого было выброшено более 2800 км³ пород, считается самым мощным на Земле за последние несколько миллионов лет. В результате этого события образовалась огромная кальдера, заполненная восьмидесятикилометровым озером – самым крупным вулканическим озером на Земле. Удивительной особенностью этого места является то, что катастрофические извержения происходили здесь неоднократно, по крайней мере трижды за последний миллион лет.

Человеческая цивилизация за время своего существования ни разу не сталкивалась с суперизвержениями. Самое крупное извержение, зарегистрированное человеком, объем которого составил около 150 км³, произошло на вулкане Тамбора в Индонезии в 1815 г. Эта катастрофа привела к существенному понижению температуры во всем Северном полушарии и к десяткам тысячам жертв вследствие голода и эпидемий. Вместе с тем масштаб этого события несовместим с последствиями суперизвержений. Поскольку супервулканы несут потенциальную опасность для человечества, необходимо относиться очень внимательно к изучению процессов, происходящих в них, и отслеживать все аномалии в их деятельности.

Авторы работы построили детальную сейсмическую модель строения коры и мантии под кальдерой Тоба с использованием метода сейсмической томографии, разработанного в Новосибирске. С помощью этой модели удалось обнаружить несколько уровней магматических очагов под кальдерой и реконструировать механизм реализации повторяющихся суперизвержений.

Основной причиной суперизвержений является накопление в недрах Земли воды, которая, как это ни парадоксально, является наиболее взрывоопасным веществом. В районе кальдеры Тоба реализуется ме-

УСКОРИТЕЛЬ БУДУЩЕГО: КАК ВЕРНУТЬ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ РОСТ ГРАФИКУ ЛИВИНГСТОНА?

Благодаря изобретению и развитию различных ускорительных технологий энергия элементарных частиц, достигаемая в современных ускорителях, резко возросла в течение последних десятилетий. Однако ученые уже сегодня обеспокоены возможностями дальнейшего прогресса в этой области. Андрей Серый – директор Института Джона Адамса (Великобритания), профессор Оксфордского университета, задается вопросами: можем ли мы подходить к решению этой проблемы более эффективно? И реально ли направлять изобретательский процесс при разработке будущих крупномасштабных ускорительных проектов с помощью рационализаторской методологии, используемой в инженерии?

Ускорительная наука и технология демонстрируют богатую историю изобретений, охватывающую к настоящему времени почти столетие. Эта увлекательная цепь событий, прекрасно изложенная в книге *Engines of Discovery: A Century of Particle Accelerators* (авторы А. Sessler и Т. Wilson), компактно представлена в виде так называемого графика Ливингстона, где уровень эквивалентной энергии ускоренного пучка частиц является функцией времени. График наглядно иллюстрирует, что в течение многих десятилетий уровень эквивалентной энергии ускоренного пучка частиц экспоненциально возрастал, а новые продвинутое технологии вытесняли устаревшие, полностью выработавшие свой потенциал. Последние десятилетия тоже были богаты на изобретения, примеры которых включают в себя концепцию фотонного коллайдера (которая пока находится еще на стадии идеи); концепцию коллайдера с «крабовидным фокусом» (проверенная экспериментально на накопителе элементарных частиц DAFNE в Италии), а также интегрируемую оптику для накопителей, проверка которой планируется на ускорителе IOTA в Фермилабе.

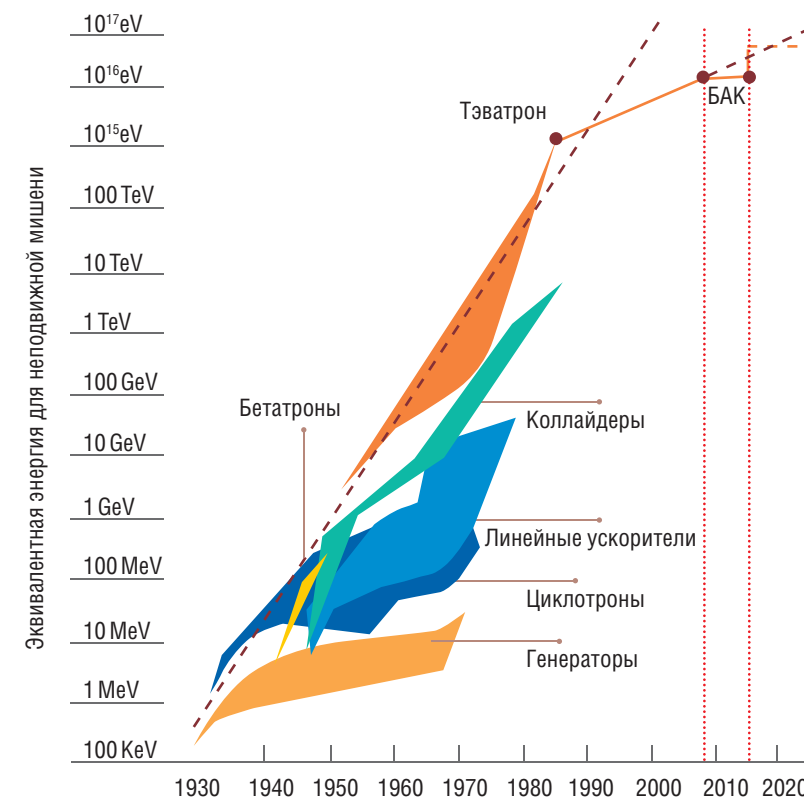
Однако несмотря на все эти недавние открытия и изобретения, существует причина для беспокойства относительно прогнозов на будущее. Дело в том, что три последних десятилетия, когда были построены Тэватрон и Большой адронный коллайдер (БАК), характеризуются гораздо более медленным темпом роста энергии самых мощных ускорителей. Это может быть признаком того, что ныне существующие технологии ускорения частиц достигли пика в своем развитии, и что дальнейший прогресс будет требовать создания принципиально новых ускорительных устройств –

Быть может, эти электроны –
Миры, где пять материков,
Искусства, знания, войны, троны
И память сорока веков!
Еще, быть может, каждый атом –
Вселенная, где сто планет;
Там – все, что здесь, в объеме сжатом,
Но также то, чего здесь нет.
Мир электрона
(Валерий Брюсов, 1920)



Схематическое изображение треков частиц в камере Вильсона и камере Глейзера как пример системы и антисистемы.
Рис. Е. Серой

На графике Ливингстона уровень эквивалентной энергии ускоренного пучка частиц является функцией времени. По мере возрастания уровня эквивалентной энергии ускоренного пучка на смену устаревшим технологиям приходят более продвинутые



более компактных и экономичных. И хотя сегодня уже существует несколько новых методов ускорения (например, на лазерной или плазменной основе – *CERN Courier*, June 2007. P. 28), которые, возможно, вернут кривую энергии на графике Ливингстона на путь



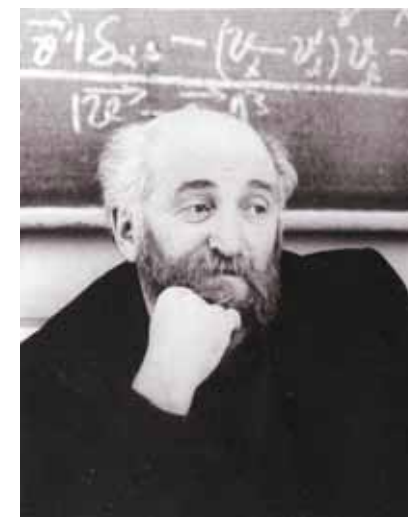
СЕРЫЙ Андрей Анатольевич – директор Института ускорительной физики им. Джона Адамса (JAI) (Великобритания), профессор Оксфордского университета. Автор и соавтор более 200 научных работ

Ключевые слова: ускорители, Большой адронный коллайдер, ТРИЗ, ЦЕРН, физика высоких энергий, синхротронное излучение, Оксфорд, изобретательство
Key Words: accelerators, Large Hadron Collider, TRIZ, CERN, high energy physics, synchrotron radiation, Oxford, invention



экспоненциального роста. Тем не менее, вдохновляясь прошлыми успехами и мечтая о будущем, мы имеем право поставить вопрос: как можно изобретать еще более эффективно?

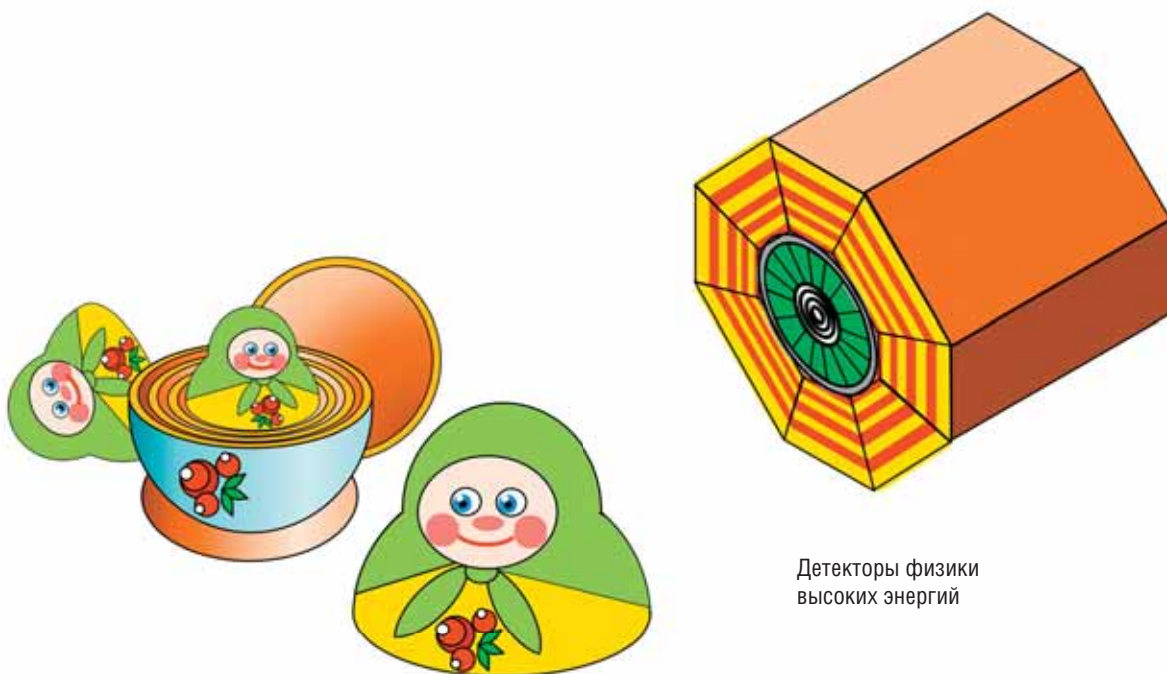
Давайте вспомним некоторые факты из биографии двух выдающихся ученых-ускорительщиков. Один из них – Джон Адамс, который в 1950-е гг. сыграл ключевую роль в воплощении смелого решения отменить уже утвержденный проект слабофокусирующего уско-



Слева направо: Джон Адамс, британский физик-ускорительщик, генеральный директор ЦЕРНа (1960—1061 г.). © CERN PhotoLab, 2016; Герш Ицкович (Андрей Михайлович) Будкер, советский физик, основатель и первый директор ИЯФ СО РАН; Генрих Саулович Альтшуллер, автор теории решения изобретательских задач (ТРИЗ)

ПРИНЦИП «МАТРЕШКИ»

- Поместить объект внутрь другого, который, в свою очередь, поместить внутрь следующего
- Пропустить одну деталь через отверстие другой детали



Детекторы физики высоких энергий

рителя на 10 ГэВ ради создания полностью новаторской машины – протонного синхротрона на 25 ГэВ на основе сильной фокусировки для ЦЕРНа. Другой – Г. И. Будкер, основатель и первый директор новосибирского Института ядерной физики, автор многих инноваций в области ускорительной физики, таких как электронное охлаждение. В нашем контексте важно то, что обоих ученых отличало уникальное сочетание научных и инженерных способностей (Лев Ландау даже как-то назвал Будкера «релятивистским инженером»). Это сочетание примечательно тем, что искусство изобретательства, которое я собираюсь обсудить, пришло в науку именно из инженерии.

Наверное, все знают о таких подходах к решению проблем, как мозговой штурм или его улучшенная версия – синектика. Кстати, одним из ее методов является использование описания проблемы языком сказок или легенд. Но в то же время весьма возможно, что большинство работающих в науке людей никогда не слышали об изобретательских методиках, широко используемых в промышленности инженерами. И это неведение воистину удивительно. Оно широко распространено в западных лабораториях. В России про метод ТРИЗ многие слышали, но почти никто, тем не менее, его не применяет в исследовательской работе.

Многослойный детектор частиц как пример принципа матрешки. Рис. Е. Серой

Одним из таких подходов является ТРИЗ – Теория Решения Изобретательских Задач, разработанная в СССР в середине прошлого века Генрихом Альтшуллером, работавшим в начале своего жизненного пути в патентном бюро. Начиная с 1946 г. он проанализировал многие тысячи патентов, пытаясь выявить ключевые моменты, которые делают патент успешным. Основные алгоритмы ТРИЗ он сформулировал в 1956–1985 гг., а потом развивал их вместе с командой единомышленников.

Постепенно эта теория стала одним из самых мощных инструментов развития в индустриальном мире. Ярким примером этого служит статья «Российские “мозги” Samsung: как россияне помогли этой компании стать лидером в информационных технологиях» известного обозревателя-аналитика журнала *Forbes* Гайдна Шонесси, опубликованная 18 марта 2013 г. По словам Шонесси, именно ТРИЗ «стала основой инноваций в Samsung», и что «знание ТРИЗ в настоящее время является обязательным требованием к претенденту, желающему делать карьеру в этой компании».

Методология изобретательства

Авторы ТРИЗ сформулировали следующие четыре «краеугольных камня» этого метода:

- в различных отраслях промышленности возникают одни и те же проблемы, и те же самые решения для них находятся снова и снова;
- существует определенный путь технологического развития для всех отраслей промышленности;
- инновационные патенты (составляющие около четверти от общего числа патентов) используют научные и инженерные теории, взятые за пределами своей области знания;
- инновационный патент раскрывает и разрешает противоречия.

Команда Альтшуллера также разработала подробную методологию, которая использует таблицу типичных противоречий и удивительно универсальную таблицу из 40 изобретательских принципов. Основной метод ТРИЗ состоит в выявлении в технической задаче пары противоречащих параметров. После чего инженер, используя таблицы ТРИЗ, сразу же получает небольшой список изобретательских принципов, подходящих для решения этой задачи. Ограничение числа вариантов, которые нужно перебрать, приводит к более быстрому решению проблемы.

Учебники по ТРИЗ часто ссылаются на изобретения камеры Чарльза Вильсона (1911 г.) и пузырьковой камеры Дональда Глейзера (1952 г.) в качестве примера системы и антисистемы, используя терминологию ТРИЗ. Суть в том, что камера Вильсона работает по принципу появления капелек жидкости в газе, в то время как пузырьковая камера использует пузырьки газа, возникающие в жидкости. Если бы при создании этих

устройств был применен изобретательский принцип «система – антисистема», то пузырьковая камера была бы изобретена сразу же после создания камеры Вильсона, а не через полвека, как это произошло в реальности.

Другой изобретательский принцип ТРИЗ – принцип «матрешки» – встречается не только в технике, но и во многих других областях, включая физические и естественные науки и даже филологию. Всем известный «Дом, который построил Джек» из британских «Сказок Матушки Гусыни», а также процитированное в эпиграфе стихотворение Валерия Брюсова, где электрон описывается как планета в мире связанных элементарных частиц, иллюстрируют этот принцип. Захватывающим примером научной «матрешки» является структура детектора для физики высоких энергий, где много различных субдетекторов вставлены друг в друга для повышения точности обнаружения неуловимых частиц. Такие детекторы используются, чтобы определить, есть ли на самом деле внутри электрона свой «мир», – круг замкнулся!

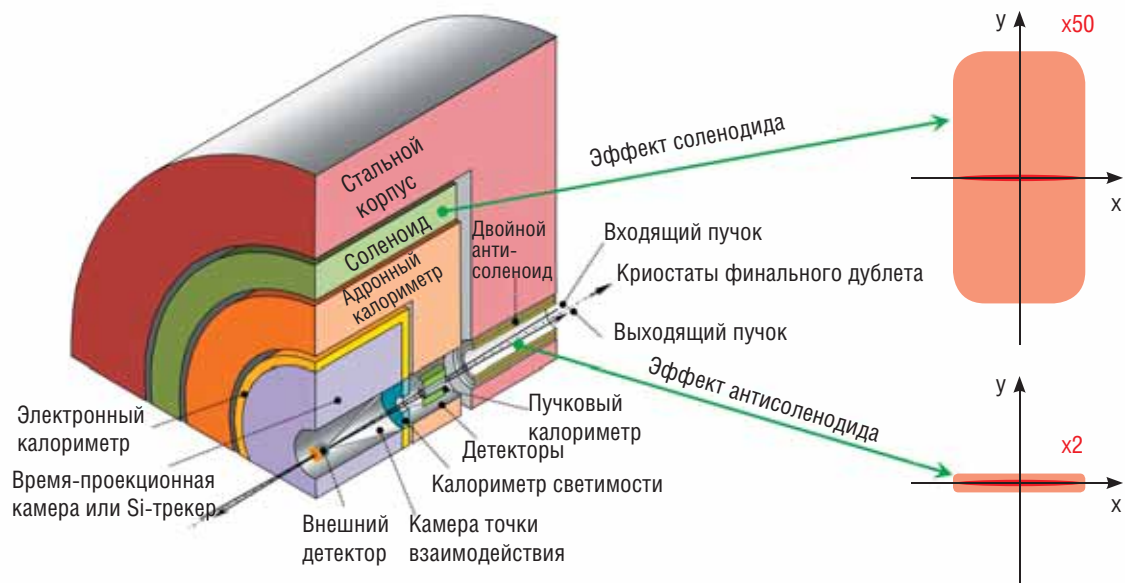
Методы ТРИЗ могут быть применены и в ускорительной науке. Например, двойной нейтральный антисоленоид в точке взаимодействия пучков коллайдера или ЯМР-сканер иллюстрируют сразу два изобретательских принципа – «матрешка» и «система–антисистема». В антисоленоиде два соленоида противоположной

Андрей и Елена Серые – авторы книги «Изобретая инструменты науки будущего. Ускоряющая науку ТРИЗ: Физика ускорителей, лазеров и плазмы» (русское издание) – рассказывают о том, как изобретательские принципы позволяют сделать следующий шаг в разработке нового поколения ускорителей



ПРИНЦИП ЧАСТИЧНОГО ИЛИ ИЗБЫТОЧНОГО РЕШЕНИЯ

Если при использовании какого-либо метода трудно достичь стопроцентного эффекта, можно ограничиться «чуть меньшим» или «чуть большим» воздействием этого же метода, чтобы превратить задачу в гораздо более простую



Сильная связь из-за перекрытия соленоида с квадрупольями финального дублета → частичная компенсация слабым анти-соленоидом (Nosochkov, Seryi, 2005)

полярности вставлены друг в друга таким образом, что весь магнитный поток сосредоточивается между ними, а снаружи силовое поле практически отсутствует, т.е. во внешнем поле на него сила не действует. Этот прием в ЯМР практически снимает проблему магнитного экранирования, а в коллайдере снижает интерференцию с главным соленоидом детектора.

Примечательно, что эту же комбинацию изобретательских принципов можно найти в методике STED-микроскопии (флуоресцентной микроскопии на основе подавления спонтанного излучения), авторы которой были награждены в 2014 г. Нобелевской премией по химии. А иллюстрацией изобретения по принципу ТРИЗ, известному как принцип «заранее подложенной подушки», может служить финальная фокусирующая система в ускорителе с «нелокальной коррекцией хроматизма».

В то время как многие из изобретательских принципов ТРИЗ могут быть применены для решения проблем ускорительной науки непосредственно, было бы заманчиво добавить к ТРИЗ и изобретательские принципы, специфичные для ускорительной науки. Например, исходя из уравнений Максвелла, где интеграл по поверхности связан с интегралом по объему, добавить принцип изменения соотношения объема и площади поверхности объекта. Прекрасную иллюстрацию этого

принципа можно увидеть в природе, когда обычная домашняя кошка в жару вытягивается, разворачивая свою «поверхность», а на холоде сворачивается клубком, уменьшая ее. Тот же принцип в ускорительной технологии демонстрируют, например, «плоские» встречные электрон-позитронные пучки или волоконные лазеры. Другой принцип изобретения, который можно привести в ускорительную науку, – использование неповреждаемых или уже «поврежденных» материалов (например, лазерной «нити» для диагностики ускорительного пучка, струи жидкой ртути в качестве мишени, плазменного ускорения, плазменного зеркала, и т.п.).

Итак, методы ТРИЗ, изначально разработанные только для инженерии, являются универсальными и могут быть применены в науке. Методология ТРИЗ – это еще один способ смотреть на мир. А в сочетании с наукой она превращается в еще более мощный метод. ТРИЗ особенно полезна для наведения мостов между принципиально различными научными дисциплинами, поэтому должна быть востребована образовательными и исследовательскими организациями, пытающимися сломать междисциплинарные барьеры.

И все-таки опыт показывает, что в научных отделах западных университетов ТРИЗ практически не изучается и не используется. Более того, неудачей заканчивались даже попытки ввести ТРИЗ в аспирантские спецкурсы. Во многих (даже в большинстве) таких случаев вероятная причина неудачи состоит в том, что аспирантам преподавалась каноническая версия ТРИЗ,

как и инженерам в промышленных компаниях. По-видимому, в этом-то и состоит ошибка – ведь студенты, специализирующиеся в науке, объективно настроены скептически в отношении методов, которые чрезмерно, «шаг за шагом», регламентируют рабочий процесс. В самом деле, любой критически мыслящий ученый сразу бы подверг сомнению «каноническое число» 40 (принципов изобретения), а потом отметил бы, что выявление всего лишь пары противоречивых параметров является приближением «первого порядка», и т.д.

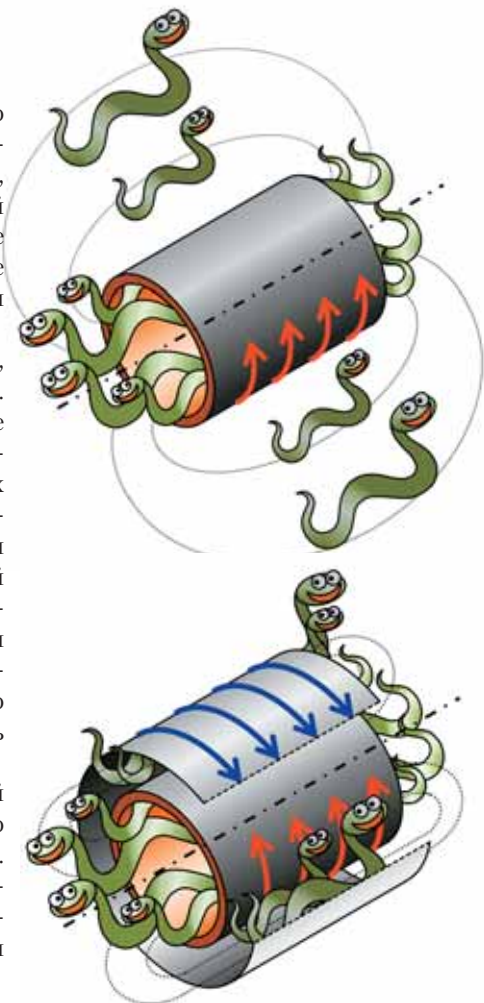
Приняв во внимание неудачи предшественников, следует, вероятно, выбрать другой, более приемлемый подход к курсу ТРИЗ для аспирантов. Вместо того чтобы излагать готовую к употреблению методологию, лучше провести слушателей через сам процесс создания элементов ТРИЗ, предлагая анализировать различные новые изобретения и открытия из разных научных дисциплин, демонстрируя тем самым, что изобретательские принципы ТРИЗ могут быть эффективно применены в науке. В этом творческом процессе могут быть найдены дополнительные принципы изобретательской деятельности, которые больше подходят для научных дисциплин и которые, возможно, будут впоследствии добавлены к стандарту ТРИЗ. В своем недавно вышедшем учебнике я назвал это расширение теории «Ускоряющая наука ТРИЗ» (Accelerating Science TRIZ, УН-ТРИЗ), где слово «ускоряющая» теперь уже подчеркивает, что ТРИЗ может способствовать ускоренному развитию науки – любой, а не только ускорительной.

Многие из рассмотренных выше примеров «тризоподобных» изобретений в науке были сделаны без использования этих принципов, и я намеренно «провоцирую» читателя, подключая эти примеры к ТРИЗ постфактум. Тем не менее естественно задаться вопросом: способны ли ТРИЗ и УН-ТРИЗ реально помочь, вдохновляя на новые научные изобретения и инновации, особенно в отношении проектов, для реализации которых имеется много нерешенных препятствий?

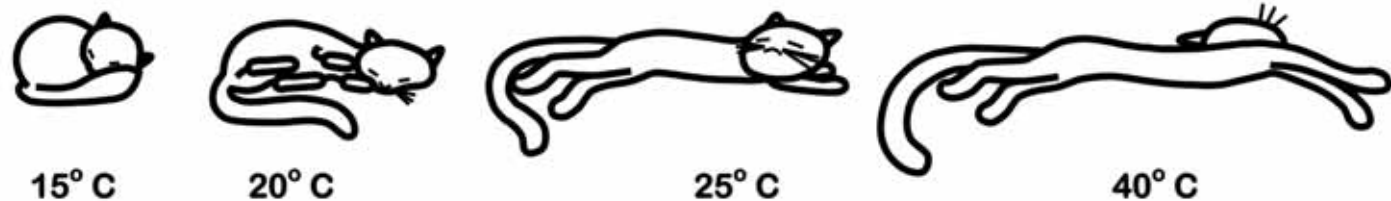
Один из примеров такого проекта – кольцевой коллайдер FCC, 100-километровая по окружности ускорительная машина, рассматриваемая в настоящее время в качестве преемника БАК (CERN Courier, April 2014, P. 16). В этом проекте до сих пор имеется множество научных и технических задач и проблем, которые требуется решить. Примечательно, что полная энергия каждого протонного пучка в этом коллайдере, как ожидается, будет превышать 8 ГДж, что эквивалентно кинетической энергии аэробуса A380, летящего на скорости 720 км/ч. Нужно, чтобы каждый такой мощный пучок не только безопасно транспортировался поворотными магнитами, но чтобы все эти пучки одновременно столкнулись в точке взаимодействия коллайдера – участке микрометрового размера, много меньшем, чем игольное ушко.

Нам предстоит узнать на практике, можно ли применять методологии ТРИЗ и УН-ТРИЗ к таким масштабным проектам, как FCC, который ставит перед нами целый ряд новых сложных и интересных задач. Ведь это как раз тот проект, который может «расцвести» лишь при условии применения немалых знаний и большой изобретательности.

По материалам статьи «Inventing our future accelerator» // CERN COURIER, 2015



Вокруг простого соленоида существует заметное магнитное поле. Два соленоида противоположной полярности вставлены друг в друга таким образом, что весь магнитный поток сосредоточивается между ними, а снаружи силовое поле практически отсутствует. Изобретение такого двойного антисолоида могло быть сделано при использовании изобретательских принципов ТРИЗ, известных под названиями «матрешка» и «система-антисистема». Рис. Е. Серой



Н. Л. ДОБРЕЦОВ, Е. В. КУКАРИНА

ВЕНЕРА КАК ВОЗМОЖНОЕ БУДУЩЕЕ ЗЕМЛИ

В апреле 2016 г. я прочитал краткий курс геодинамики в Московском государственном университете. Заключительная лекция была посвящена эволюции Земли и планет Солнечной системы. На ней один из слушателей спросил, может ли в будущем у Земли появиться атмосфера, подобная современной атмосфере Венеры. Как известно, эта планета имеет наиболее специфическую атмосферу – очень горячую (до 450 °С) и плотную, состоящую в основном из CO₂.

Я сразу ответил: «А почему нет? Вполне возможно, так как на Земле накоплено в поверхностных слоях огромное количество карбонатных пород, и если предстоящий нагрев поверхности Земли (за счет превращения Солнца в красного гиганта) достигнет достаточной величины, возможна декарбонатизация и быстрый рост содержания CO₂ в атмосфере, как и ее плотности. Так что Венера может быть моделью для будущего Земли».

После этого я продолжил думать об этой идее, высказанной экспромтом, и нашел дополнительные аргументы и возможный сценарий такого развития событий, что и постарался изложить в настоящей статье

Чтобы ответить на вопрос о будущем нашей планеты, в первую очередь следует взглянуть на эволюцию Солнечной системы в целом, так как все ее планеты имеют общее происхождение, и их внешние оболочки сильно зависят от активности Солнца.

Считается, что планеты нашей системы сформировались из гигантской протопланетной газопылевой туманности примерно в одно и то же время, около 4,6 млрд лет назад (Витязев, 1983; Витязев, Печерникова, 2009; Ernst, 2014).

Дальнейшую эволюцию планет условно делят на шесть стадий, причем первые три стадии характерны только для планет земной группы – Меркурия, Марса и Земли, а также, частично, Луны, на которых они проходили во многом синхронно.

Что касается Венеры, то о ранних стадиях ее эволюции мы знаем пока недостаточно, потому что на этой планете древние геологические структуры перекрыты молодыми вулканическими породами, а из-за плотной облачности изучение ее поверхности очень затруднено (Head, 2014; Ernst, 2014).



ДОБРЕЦОВ Николай Леонтьевич – действительный член РАН, профессор, председатель Объединенного ученого совета наук о Земле РАН, главный научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск), заведующий кафедрой минералогии и петрографии геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета, главный редактор журнала «НАУКА из первых рук». Лауреат Ленинской (1976), Государственной (1997), Демидовской (1999) премий, премии им. А. Н. Косыгина (2003), ордена Трудового Красного Знамени и др. Автор и соавтор более 700 научных работ

Credit: NASA; NASA/JPL

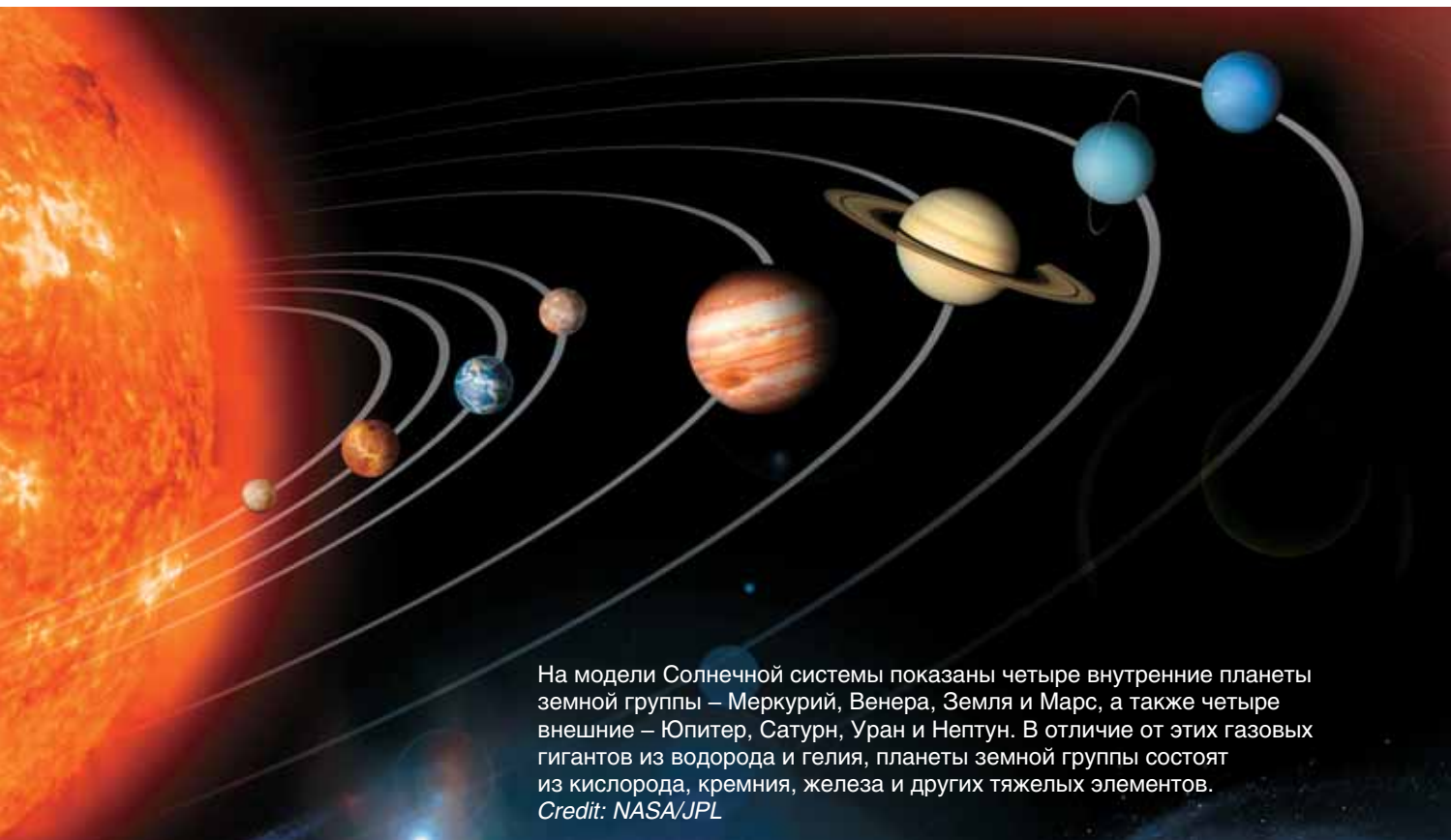


КУКАРИНА Екатерина Васильевна – младший научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск) и Новосибирского государственного университета. Автор и соавтор 5 научных работ

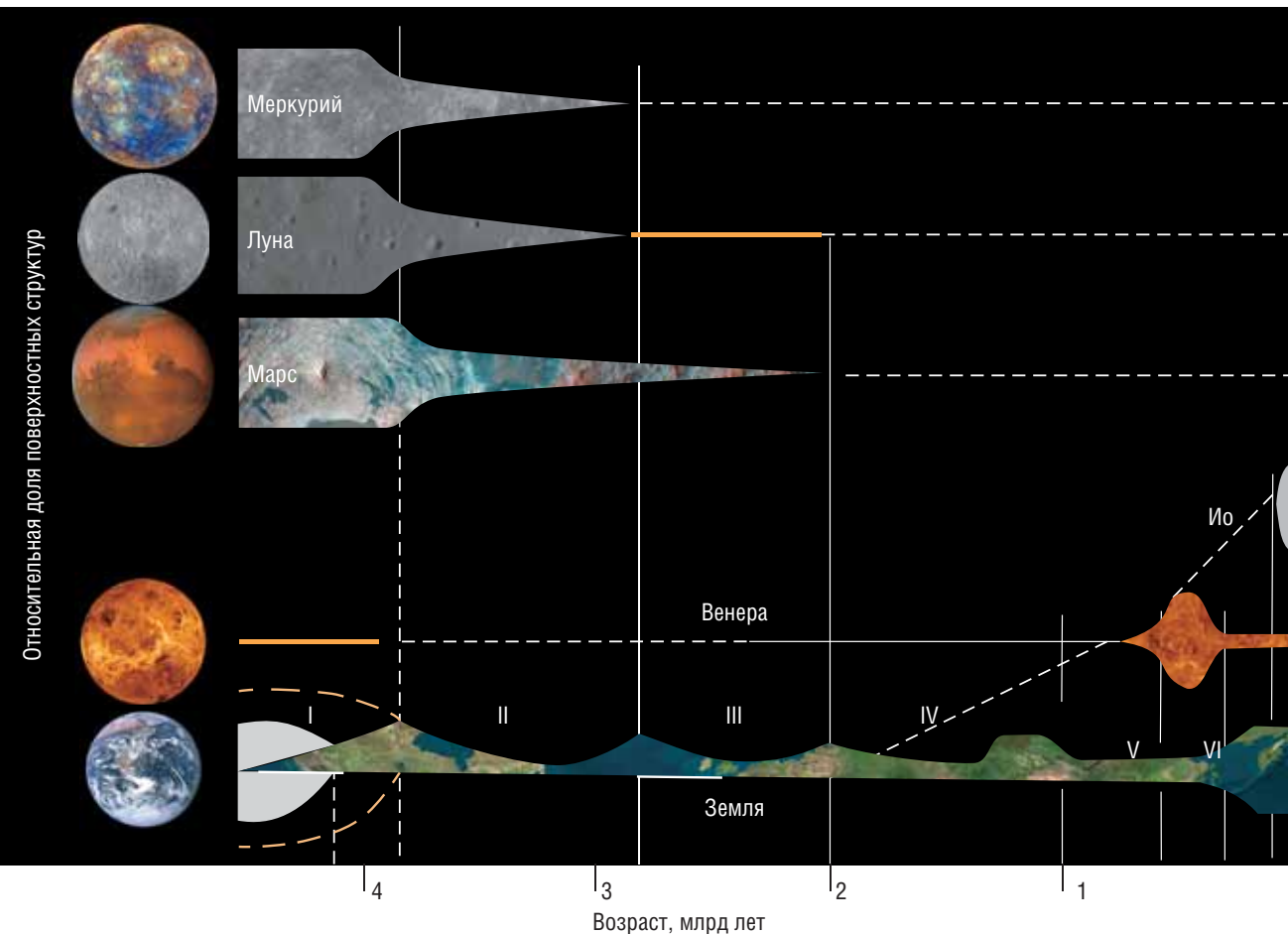
Ключевые слова: Венера, Земля, эволюция планеты, эволюция жизни, бактерии, климат, атмосфера, вулканизм.

Key words: Venus, Earth, planet evolution, life evolution, bacteria, climate, atmosphere, volcanism

© Н. Л. Добрецов, Е. В. Кукарина, 2016



На модели Солнечной системы показаны четыре внутренние планеты земной группы – Меркурий, Венера, Земля и Марс, а также четыре внешние – Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. В отличие от этих газовых гигантов из водорода и гелия, планеты земной группы состоят из кислорода, кремния, железа и других тяжелых элементов.
Credit: NASA/JPL



Рождение планет

Итак, первая стадия формирования планет – это *аккреция*, сгущение газопылевой туманности. Для Земли длительность этого процесса по данным моделирования и изотопного анализа составила около 100–120 млн лет (Витязев, Печерникова, 2009; Kleine *et al.*, 2002). Примерно столько же длилась эта фаза у Марса, Меркурия и, по-видимому, у Венеры (Head, 2014; Ernst, 2014). Формирование Луны шло другим путем и на порядок быстрее: она отделилась от Земли в результате столкновения с гипотетической планетой размером с Марс либо перестройки двойной планеты.

На стадии аккреции сформировалась и первичная атмосфера планет земной группы, которая в дальнейшем заметно эволюционировала. В тяжелой и плотной атмосфере юной Земли отсутствовал кислород, но было много свободного водорода и простейшего углеводорода – метана. Постепенно, параллельно с образованием океана она трансформировалась в современную мало-плотную атмосферу, состоящую из свободного азота и кислорода (Адушкин и др., 2007; Жарков, 2013). О пер-

вичной атмосфере Венеры мы ничего не знаем, кроме того, что свой современный облик она обрела около 1 млрд лет назад в результате активных вулканических процессов.

Стадия аккреции и последующего раннего развития, сопровождавшегося метеоритными бомбардировками на всех планетах земной группы, кроме Венеры, и Луне, завершилась около 3,8 млрд лет назад, что подтверждается изотопными данными для Земли и Луны. На следующей, II стадии закончилась и тяжелая метеоритная бомбардировка Луны, Земли и, вероятно, Марса (Bottke *et al.*, 2012). Наиболее отчетливые следы этого грандиозного явления обнаружены на «безатмосферной» Луне: судя по ним, максимум падения крупных метеоритов пришелся на период 4,0–3,3 млрд лет назад, а последние из них упали на лунную поверхность не позднее 1 млрд лет назад (Hiesinger *et al.*, 2011).

Итак, первые 2,6 млрд лет на Меркурии, Марсе, Земле и Луне шли примерно схожие процессы формирования. К концу III стадии завершился плюмовый магматизм на Марсе, связанный с подъемом из глубин планеты горячих расплавов магмы, а на Меркурии

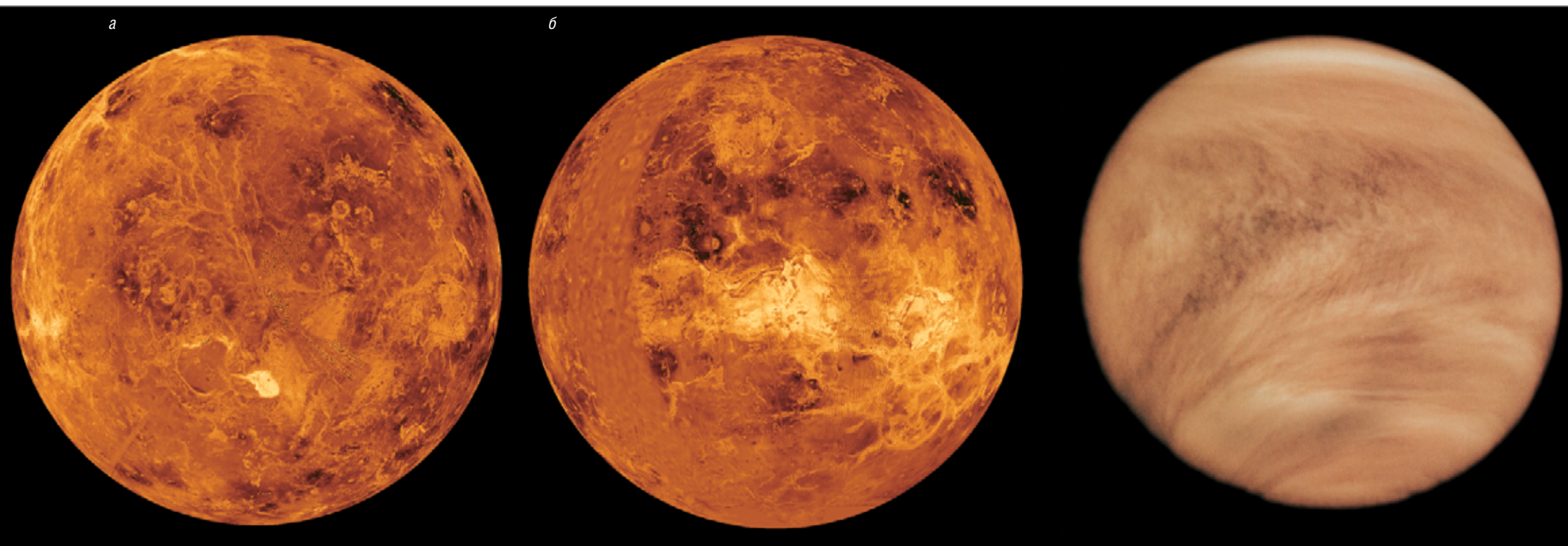
и Луне все признаки какой-либо магматической активности исчезли много ранее. Но не так обстояла ситуация на Земле и Венере. Эволюция земного океана и океанических структур, связанных с формированием и изменением структуры течений в верхнем слое мантии (астеносфере), нашли отражение в так называемой *тектонике плит* – движении гигантских базальтовых плит, которые, как кусочки мозаики, составляют литосферу Земли (Stern, 2008; Добрецов, 2009, 2010). Ничего подобного этому явлению на других планетах не было обнаружено, за исключением Марса, где на ранних этапах могли происходить явления, схожие с тектоникой малых плит, характерной для Земли в раннем протерозое (Halliday *et al.*, 2001; Ernst, 2014).

В отличие от Земли, магматическая активность и связанные с ней преобразования поверхностных структур отчетливо фиксируются на Венере только на поздних стадиях формирования планеты, как уже упоминалось выше.

Если рассмотреть ход параллельных процессов на двух этих планетах, то 1,8–1,0 млрд лет назад

Геологическую историю планет земной группы можно проследить по динамике формирования их поверхности и приповерхностных структур. Эволюцию планет земной группы можно условно поделить на шесть стадий. На I стадии происходило формирование планет за счет аккреции, лишь Луна имеет другое происхождение. На II стадии постепенно закончилась тяжелая метеоритная бомбардировка на Марсе, Земле и Луне, а также начались процессы тектоники плит, наиболее ярко выраженные на Земле. На III стадии завершился плюмовый магматизм на Марсе, а на Луне и Меркурии всякая тектоническая активность исчезла ранее.

Стадии V–VI отчетливо фиксируются лишь на Земле и Венере. На Венере это период активного плюмового магматизма, а на Земле – образования современных океанов и континентов. В последние 200 млн лет специфическая тектоническая активность проявлялась на Ио – крупнейшем спутнике Юпитера, магматизм и конвекция на котором обусловлены высоким содержанием серы и его периодическими сжатиями-растяжениями при изменении расстояния от Юпитера. По: (Head, Coffin, 1997; Ernst, 2013; 2014), с добавлениями Н.Л. Добрецова



Облака в атмосфере Венеры состоят из мельчайших капель высококонцентрированной серной кислоты. Их V-образная форма – следствие сильных ветров, дующих вблизи экватора. Из-за плотного облачного слоя поверхность Венеры можно наблюдать лишь в радио- и микроволновом диапазонах, а также в отдельных участках ближней инфракрасной области. Этот снимок поверхности Венеры сделан зондом «Пионер-Венера-1» в ультрафиолетовых лучах в 1979 г. *Credit: NASA*

В центре Венеры находится расплавленное железоникелевое ядро (1), окруженное мантией (2) и корой (3). Над поверхностью простирается плотная облачная атмосфера (4), где верхняя граница облаков проходит на высоте 65—70 км от поверхности (5). Еще выше располагается видимая с Земли внешняя «поверхность» атмосферы, характеризующаяся наиболее резкими температурными колебаниями (6).
По: (Dinwiddie et al., 2014)

на Венере началось формирование современной плотной атмосферы на фоне роста активности плюмового магматизма, завершившееся 0,8–0,5 млрд лет назад, а на Земле в этот период шло образование современных океанов, континентов и биосферы (Добрецов, 2010, 2014). За последние 200 млн лет поверхность Земли приобрела свой окончательный облик, в то время как атмосфера и вулканизм Венеры продолжали функционировать на том же самом относительно стабильном уровне.

Таким образом, эволюция всей Солнечной системы представляет собой сложнейшее явление, когда прекращение активности на одной планете сопровождается появлением или усилением активности на другой. Хотя, как отмечено выше, есть и определенное сходство стадий на разных планетах земной группы. Причиной такого сходства является, во-первых, единое происхождение планет. Во-вторых, интенсивная метеоритная бомбардировка, которой завершился процесс аккреции. И, наконец, плюмовый магматизм, яркие проявления которого периодически фиксируются на Земле в течение всей ее истории, на Марсе – первые 2 млрд лет, а на Венере – в последний 1 млрд лет.

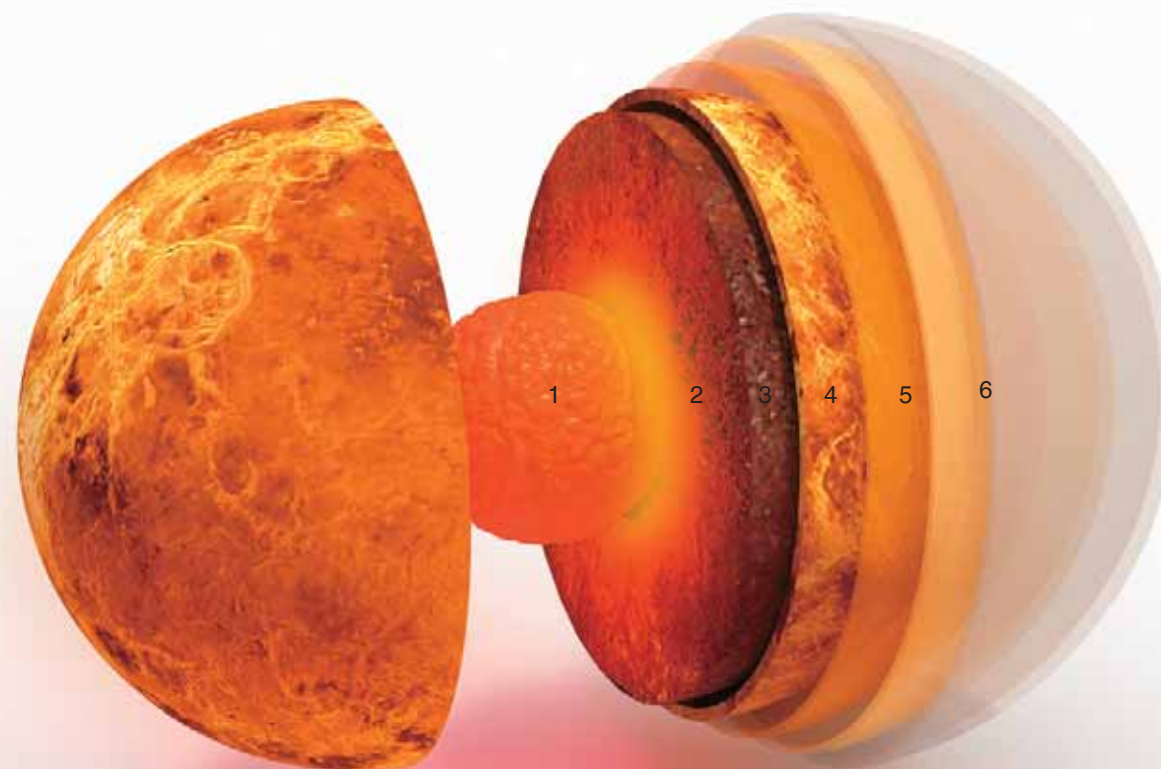
Ниже мы подробнее остановимся на условиях формирования специфической атмосферы и магматизма Венеры, а также возможности появления аналогичных явлений на поздних стадиях эволюции нашей планеты.

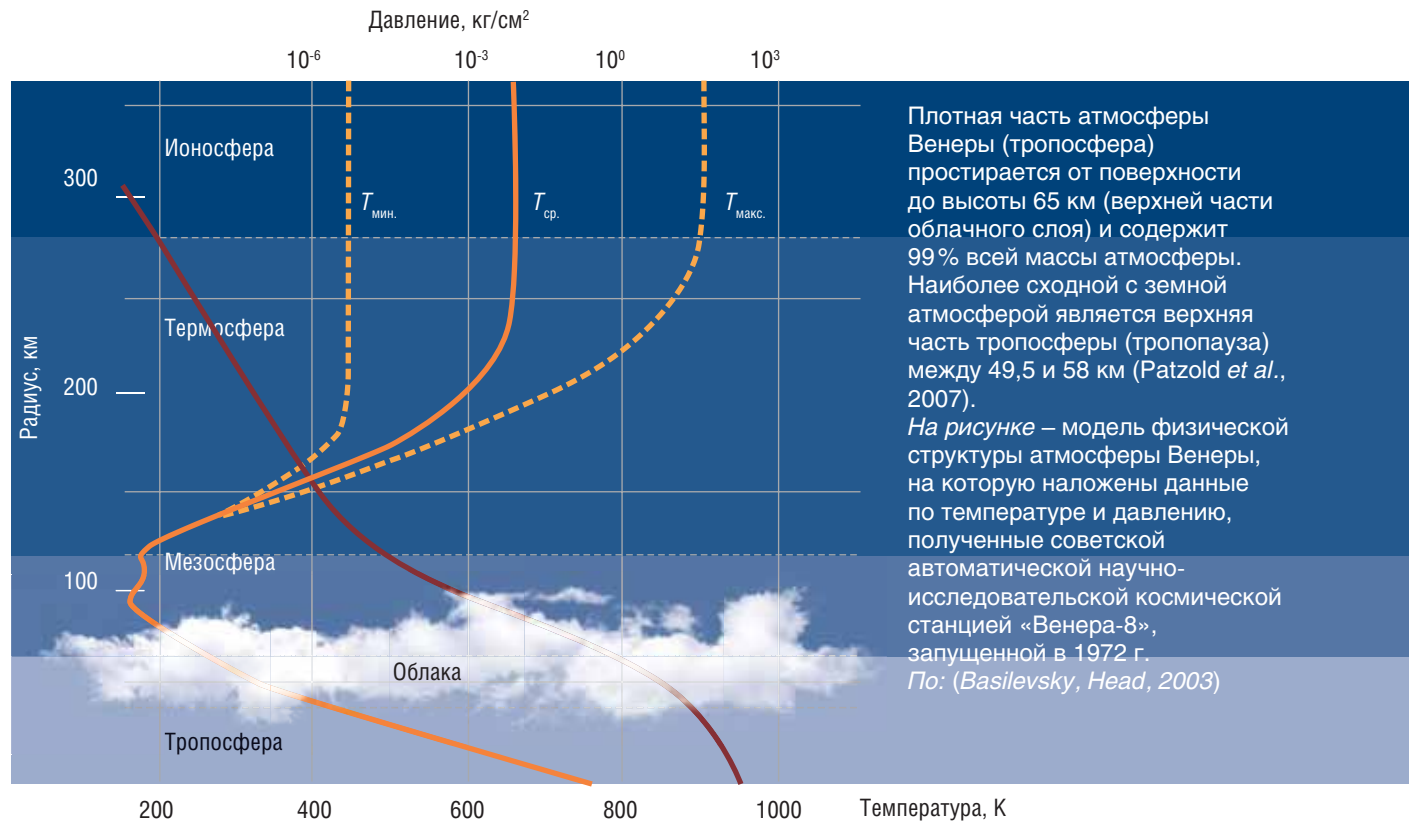
Эти изображения поверхности Венеры были получены в результате визуализации данных межпланетной станции «Магеллан», дополненных данными других космических экспедиций и наземных радиолокационных наблюдений: а – северное полушарие (яркое пятно в нижней части – горы Максвелла высотой 11 км), б – восточное полушарие (темные области – следы падения крупных метеоритов на равнинах). *Credit: NASA/JPL*

На планете с облаками из серной кислоты

С одной стороны, Венера очень похожа на Землю. Ее радиус составляет 0,95 от земного при практически одинаковой средней плотности вещества, из-за чего масса Венеры равна 0,8 от массы Земли. Однако Венера расположена ближе к Солнцу и вращается настолько медленно, что венерианский день составляет 225 земных суток. Неудивительно, что ее поверхность за 4 млрд лет нагрелась, и на ней сформировалась атмосфера, совсем не похожая на земную.

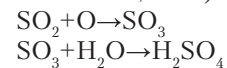
Данные по Венере продолжают уточняться, но на сегодня известно, что температура у ее поверхности составляет около 450 °С, а давление – 93(!) земные атмосферы. Основная часть атмосферы Венеры – это





углекислый газ (96,5%) с примесью азота (3,5%) и следовыми количествами молекулярного кислорода, воды, аргона, сероводорода и других соединений (Кондратьев и др., 1987; Авдучевский и др., 1995; Basilevsky, Head, 2003; Bertaux *et al.*, 2007; Svedham *et al.*, 2007). Интересно, что хотя доля азота в атмосфере Земли значительно выше, общая масса азота в венерианской атмосфере в 4 раза больше из-за ее большей плотности и размеров.

На высоте 40–65 км на дневной стороне Венеры и 50–80 км – на ночной формируется облачный слой из мелких (диаметром около 2 мкм) капель раствора серной кислоты H_2SO_4 высокой концентрации. Откуда она берется? Предположительно, серная кислота образуется благодаря фотохимическому воздействию из сернистого газа SO_2 , выбрасываемого в атмосферу с извержениями, который вступает в реакцию с активным атомарным кислородом (Basilevsky, Head, 2003; Bertaux *et al.*, 2007):



В земной атмосфере тоже происходят подобные процессы, но в гораздо меньших масштабах.

Атмосферу Венеры можно поделить на тропосферу, мезосферу, термосферу и ионосферу. Плотная ее часть – тропосфера, простирается от поверхности до 65 км

(верхней части облачного слоя) и содержит 99% всей массы атмосферы. Большая часть (90%) атмосферы Земли находится до высоты 10 км, Венеры – до высоты 28 км от поверхности. И лишь на высоте 49,5 км давление здесь становится таким же, как на Земле на уровне моря, а на высоте 54 км опускается до земных значений температура (21 °C) (Patzold *et al.*, 2007). Именно здесь, где есть водяные пары и условия среды близки к земным, может существовать жизнь, пусть и в простейшей форме (Bortman, 2004; и др.). В верхней части тропосферы благодаря сложной конвекции возникают сильные полярные вихри (Svedhem *et al.*, 2007).

Еще выше, до высоты 120 км, простирается мезосфера. Ее нижняя часть (на высоте 62–73 км) совпадает с верхним слоем облаков, а температура здесь опускается до –43 °C. Самый холодный (до –108 °C) на дневной стороне слой атмосферы располагается на высоте 73–95 км. Выше мезосферы начинается термосфера, которая характеризуется наиболее сильными температурными контрастами: на дневной стороне температура может возрастать до 127 °C, а на ночной – падать до –173 °C (Bertaux *et al.*, 2007).

Такие температурные колебания связаны с особенностями циркуляции в верхней мезосфере и термосфере. На высотах 90–150 км воздушные массы перемещаются

с дневной стороны на ночную, что сопровождается *апвеллингом* (подъемом) над освещенным полушарием и *даунвеллингом* – над темным. Ночной даунвеллинг вызывает адиабатический нагрев, что формирует относительно теплый (–40 °C) слой на ночной стороне мезосферы на высоте 90–120 км.

С термосферой практически совпадает *ионосфера*, которая располагается на высоте 120–300 км и имеет вытянутую форму. В двух ее нижних слоях ионы представлены преимущественно O^{2+} , в верхнем – O^+ , а электроны достигают максимальной плотности в среднем слое (Patzold *et al.*, 2007). Несмотря на развитую ионосферу, Венера имеет очень слабое магнитное поле, возможно, из-за отсутствия конвекции в ядре, хотя наличие на Венере интенсивного плюмового магматизма как будто противоречит этому факту (Russel, Zhong *et al.*, 2007).

Одной из важнейших нерешенных научных проблем, связанных с Венерой и ее атмосферой, является практически полное отсутствие атмосферного кислорода и воды, хотя 4–3 млрд лет назад на этой планете, вероятно, существовал океан. Сценарий перехода к современной Венере должен быть связан с эволюцией ее магматизма. По крайней мере, в последний миллиард лет именно вулканизм плюмового типа являлся на этой планете главным формообразующим процессом (Ernst, 2014).

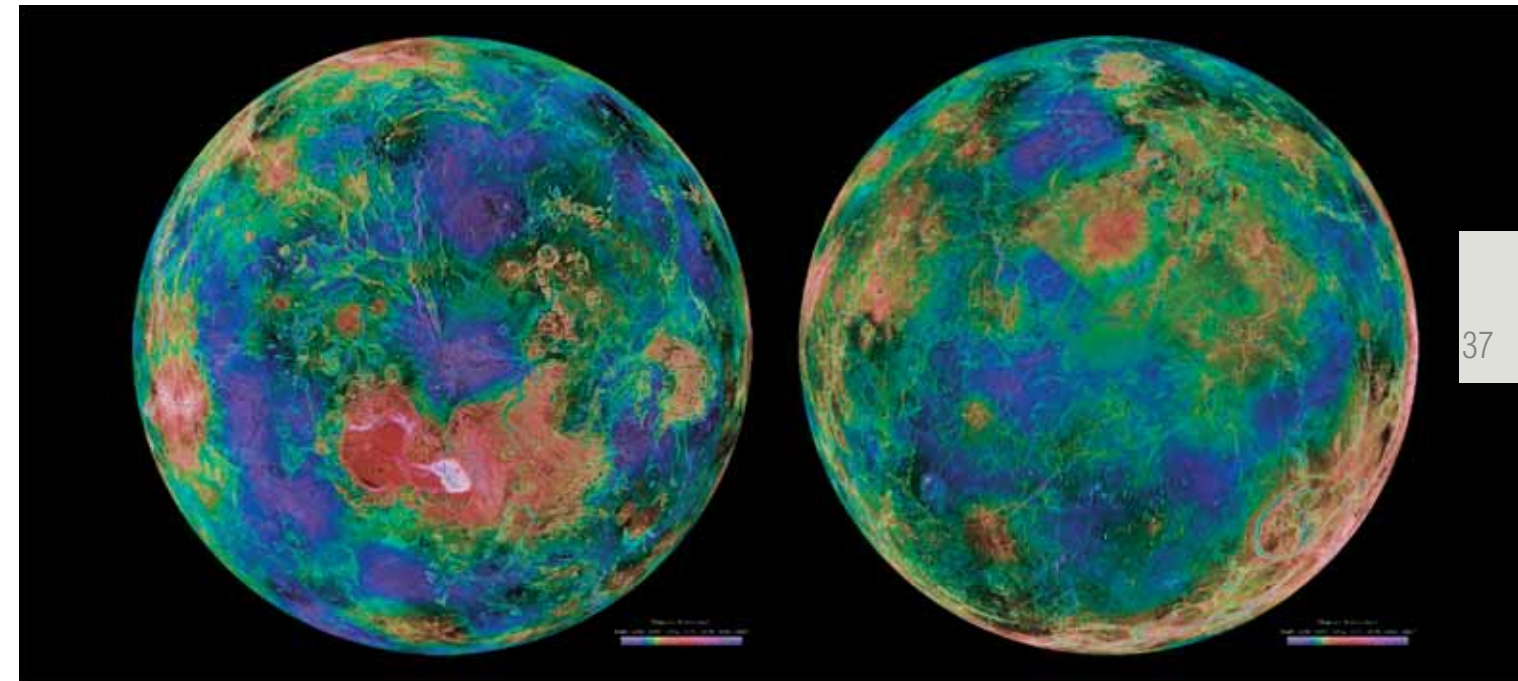
Планета вулканов

Возраст самых древних вулканических пород на Венере, представляющих собой остатки древнего фундамента и кристаллических плато, равен 0,8–2,0 млрд лет, а возраст большинства вулканитов оценивается в 500–800 млн лет (Ernst, 2014; Bjonnes *et al.*, 2012; Basilevsky, Head, 2001, 2002).

Тщательное изучение снимков поверхности Венеры позволило выделить 168 отдельных больших вулканов с диаметром более 100 км и 289 более мелких, а также 208 вулканических полей, по площади превышающих 50 тыс. км². Наиболее грандиозные вулканические поля площадью 0,2–1,6 млн км² занимают более одной десятой от площади всех венерианских равнин – преобладающей формы местного рельефа (Crumpler, Aubell, 2000; Magee, Head, 2011; Davey *et al.*, 2013).

Остальные 140 полей с меньшей площадью (около 100 тыс. км²) имеют особую радиальную структуру, в центре которой расположен большой вулкан или *корона* (крупное валообразное поднятие, окруженное *трогом* – рвом с плоской, иногда слегка выпуклой или вогнутой центральной частью). Большинство крупных лавовых полей связаны со структурами растяжения (рифтами, рифтоподобными структурами и т. п.) и сформировались, очевидно, в результате горизонтального растяжения литосферы. Для нас же особый

Эти виды северного и южного полушарий Венеры представляют собой «мозаику» из изображений, полученных в результате десяти лет радиолокационных космических и наземных исследований. Credit: NASA/JPL/USGS



интерес представляют радиальные трещинно-грабеновые системы, очень напоминающие радиальные дайковые системы Земли, связанные с мантийными плюмами – узкими горячими потоками вещества, устремляющимися к поверхности из мантии.

Первые такие поля были обнаружены на Венере еще во время проекта «Магеллан», когда межпланетная станция НАСА впервые провела полномасштабное радиолокационное картографирование поверхности планеты (Grosfils, Head, 1994). Оказалось, что радиус таких систем на Венере гораздо больше, чем на Земле, и может достигать 2,5 тыс. км. А недавно ученые предположили существование на южной окраине венерианской Земли Афродиты еще более масштабной радиальной трещинно-грабеновой системы, в центре которой расположена уникальная структура Артемиды (Ernst *et al.*, 2003; Krasilnikov, Head, 2003).

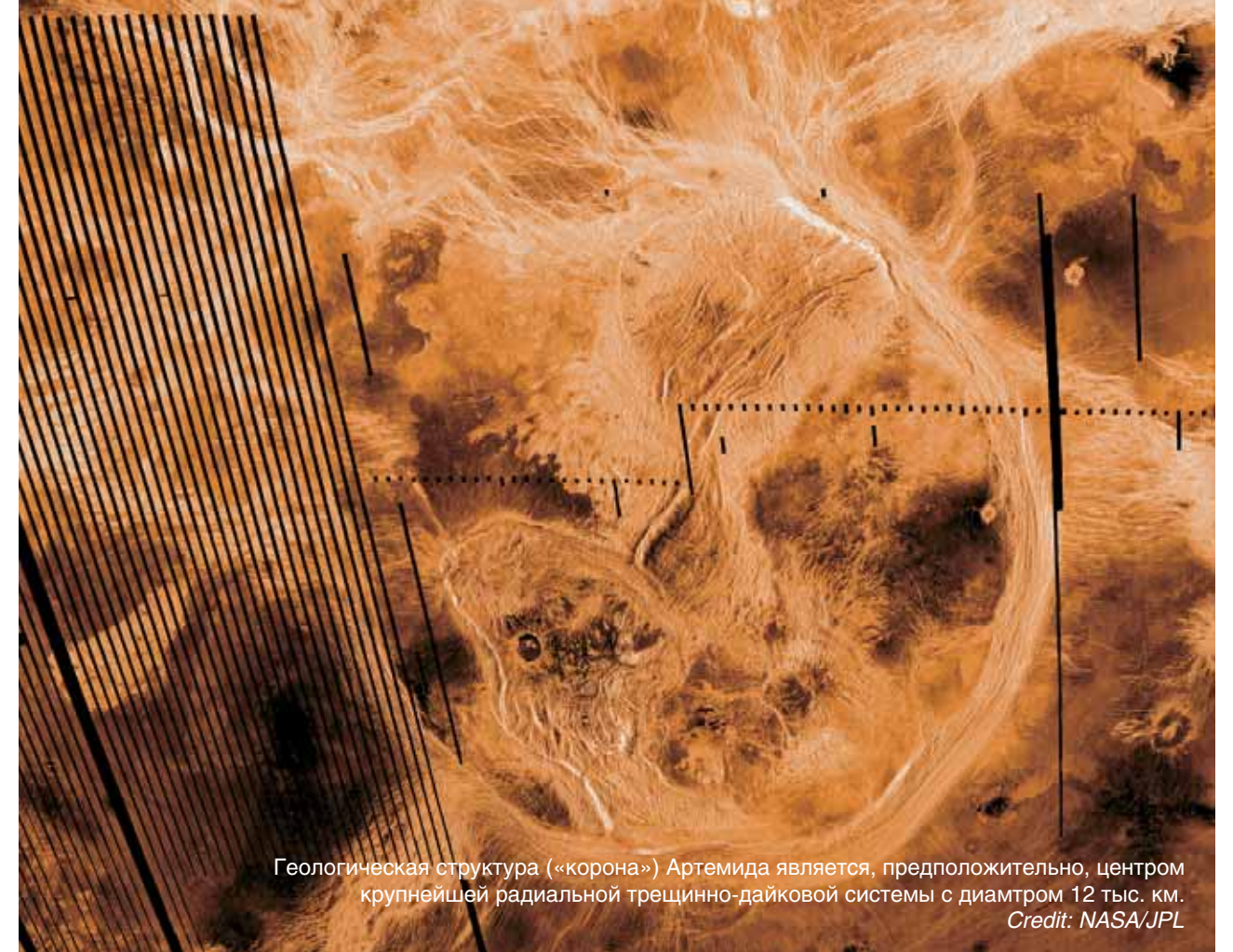
Артемиды – это деформированная корона, в которой внешний трог имеет диаметр более 5 тыс. км, при этом диаметр самой радиальной трещинно-дайковой системы составляет 12 тыс. км (Hansen *et al.*, 2000). Предполагается, что она сформировалась на тонкой литосфере и в этом смысле могла быть аналогом земных океанических мантийных суперплюмов в Индийском и Тихом океанах, где реконструируемый диаметр суперплюма близок к 10 тыс. км (Добрецов, 2010, 2011; Ernst, 2014).

Система Артемиды и некоторые крупные вулканические скопления могут также представлять собой

кластеры плюмов (Ernst, 2014). Наиболее вероятным кандидатом на эту роль является регион ВАТ, занимающий 20% поверхности Венеры, где выделяются три скопления вулканов, более 60 крупных вулканов и сотни корон, а также множество рифтов разных размеров (Basilevsky, Head, 2000; Ernst, 2014).

Считается, что почти все вулканы на Венере являются базальтовыми с примесью щелочных и кислых пород, но щелочные и карбонатные породы могут составлять и более значительную их часть (Ernst, 2014). Об этом свидетельствуют анализы поверхности Венеры, полученные с космических станций, и данные наблюдений с помощью телескопов. Р. Эрнст в своих лекциях в НГУ в марте 2016 г. привел данные, из которых можно сделать вывод, что очень жидкие потоки и озера Венеры сложены главным образом карбонатными породами, однако прямых доказательств их значительной доли в продуктах вулканизма Венеры пока нет. Эти породы могут служить главным и стабильным источником поступающего в атмосферу CO_2 и обеспечивать постоянство его содержания на протяжении миллиарда лет, несмотря на реакции диссоциации и интенсивную конвекцию.

На трехмерной модели западной части области Эйстлы в экваториальной области Венеры видны простирающиеся на сотни километров застывшие лавовые потоки, среди которых выделяются вулканы Гула и Сиф. *Credit: NASA/JPL*



Геологическая структура («корона») Артемиды является, предположительно, центром крупнейшей радиальной трещинно-дайковой системы с диаметром 12 тыс. км. *Credit: NASA/JPL*

На Земле в любой крупной плюмовой провинции обязательно присутствуют щелочные породы или карбонатиты (Buchan, Ernst, 2001; Ernst, 2014). На Венере их доля может быть значительно выше благодаря более высокой температуре не только на поверхности, но и в недрах, а также с учетом некоторых отличий по составу во внутренних оболочках этих планет. Активность плюмов на протяжении всей истории Земли оказывала сильное влияние на состав Мирового океана и биосферы. Аналогичное влияние на атмосферу и возникновение жизни на Венере могли оказать и венерианские плюмы, но этот вопрос требует дополнительных исследований.

Земной сценарий

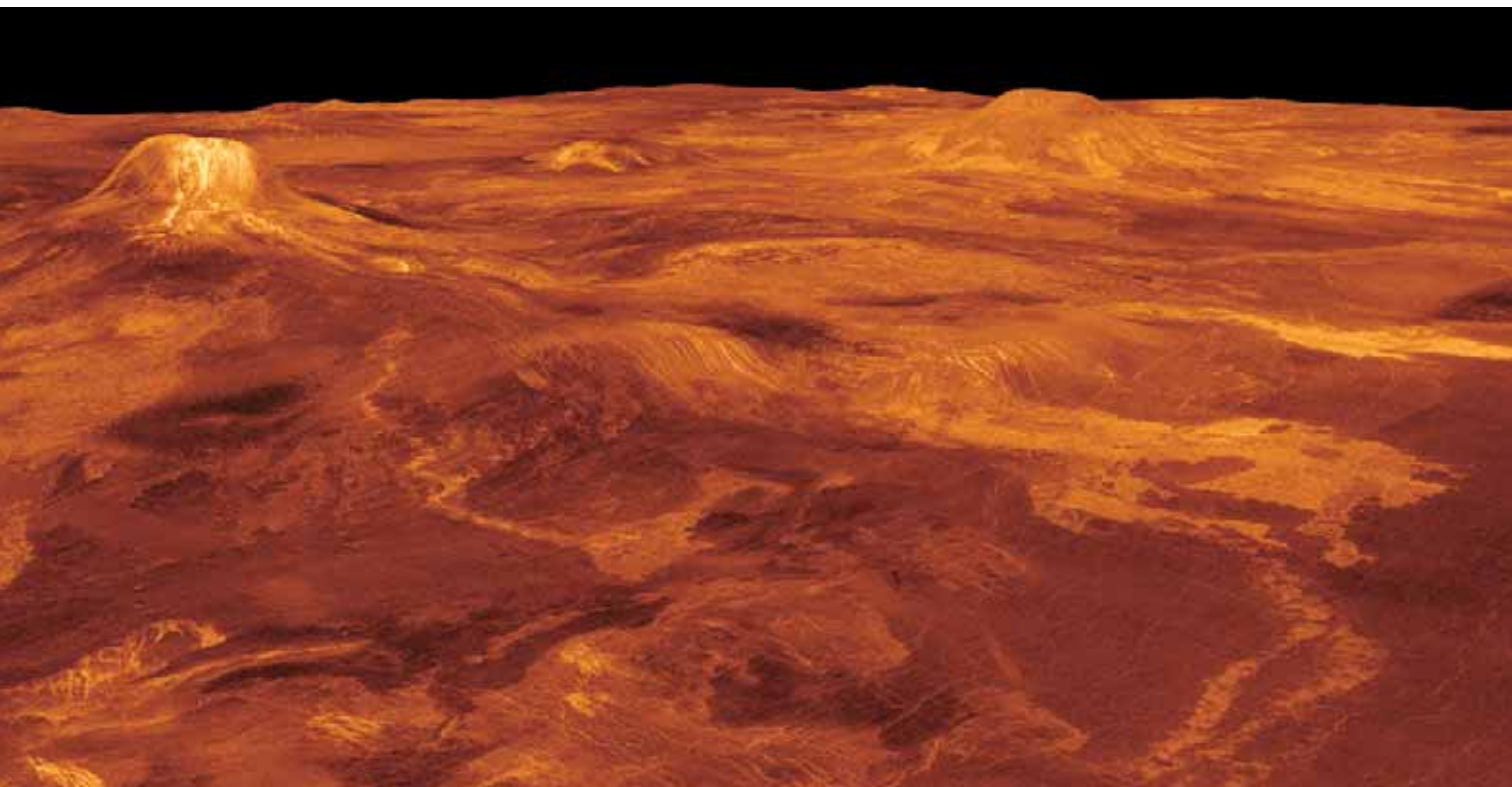
Возвращаясь к вопросу о будущем Земли, обратимся к очень интересным результатам исследований группы европейских астрономов и геологов, посвященных эволюции Земли и ее биосферы за последние 2,5 и на последующие 1,5 млрд лет, которые я уже неоднократно цитировал (Вопнова *et al.*, 2004; Добрецов, 2009, 2013).

Согласно этим работам, главным регулятором приповерхностных условий на Земле и эволюции биосферы

была и будет средняя температура ее поверхности. Когда 2,5 млрд лет назад она составляла 48–50 °С, вся биосфера была представлена простейшими одноклеточными организмами – прокариотами (бактериями и археями) общей биомассой в 400–500 Гт (гигатонн) углерода. Когда спустя 700 млн лет температура поверхности опустилась ниже 30 °С, возникли эукариоты – организмы с оформленным клеточным ядром. Примерно 1 млрд лет назад масса биосферы достигла более 1 тыс. Гт углерода, из которых 600 Гт приходилось на долю эукариотов.

Затем на Земле началось быстрое похолодание до 0–10 °С, результатом которого стали сильнейшие в истории планеты оледенения, закончившиеся 550–600 млн лет назад (Добрецов, Чумаков, 2001; Добрецов, 2009). Естественно, в эту эпоху биомасса снизилась почти вдвое, но падение сменилось быстрым ростом, завершившимся на рубеже 540 млн лет назад вторым максимумом. Главное, что в это время появились и быстро стали развиваться высшие организмы – многоклеточные эукариоты с хорошо дифференцированными тканями и органами.

В последующий период вплоть до наших дней средняя температура не опускалась ниже 10 °С и не поднималась выше 20–25 °С. Можно предположить,

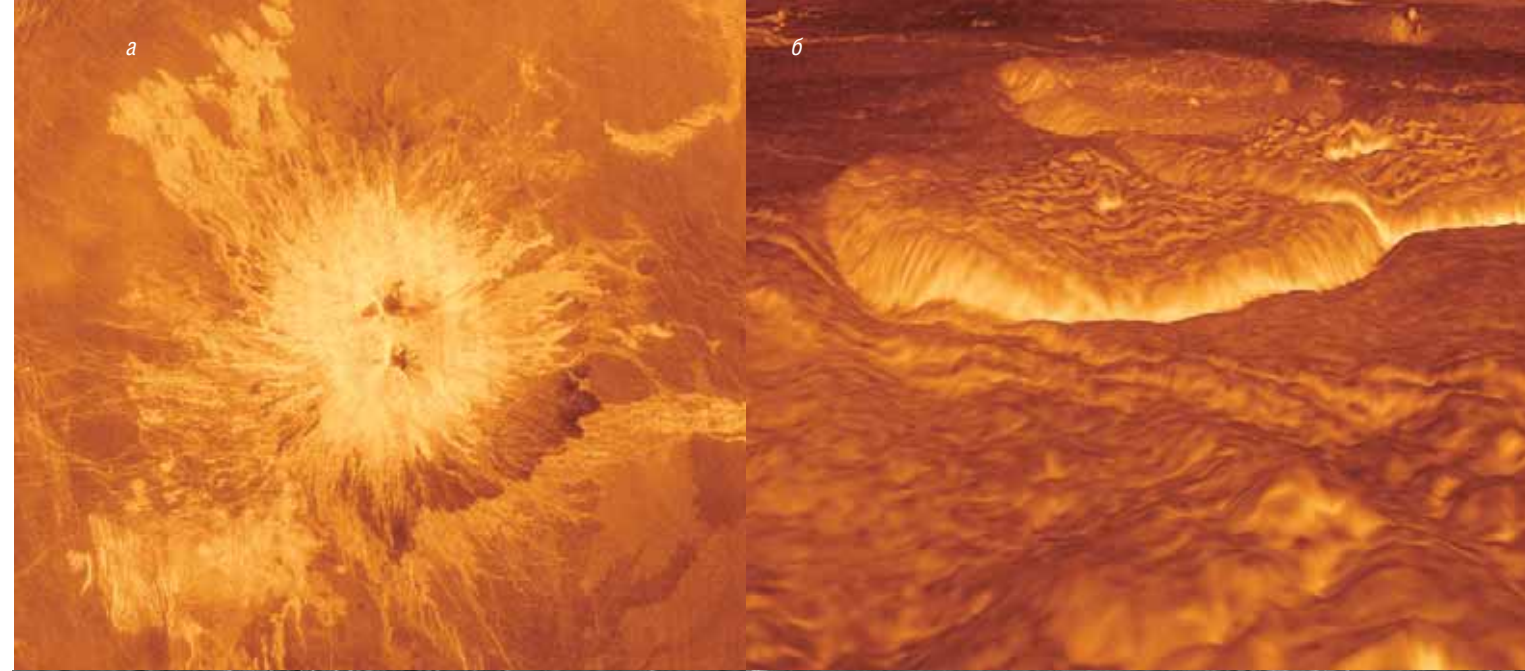
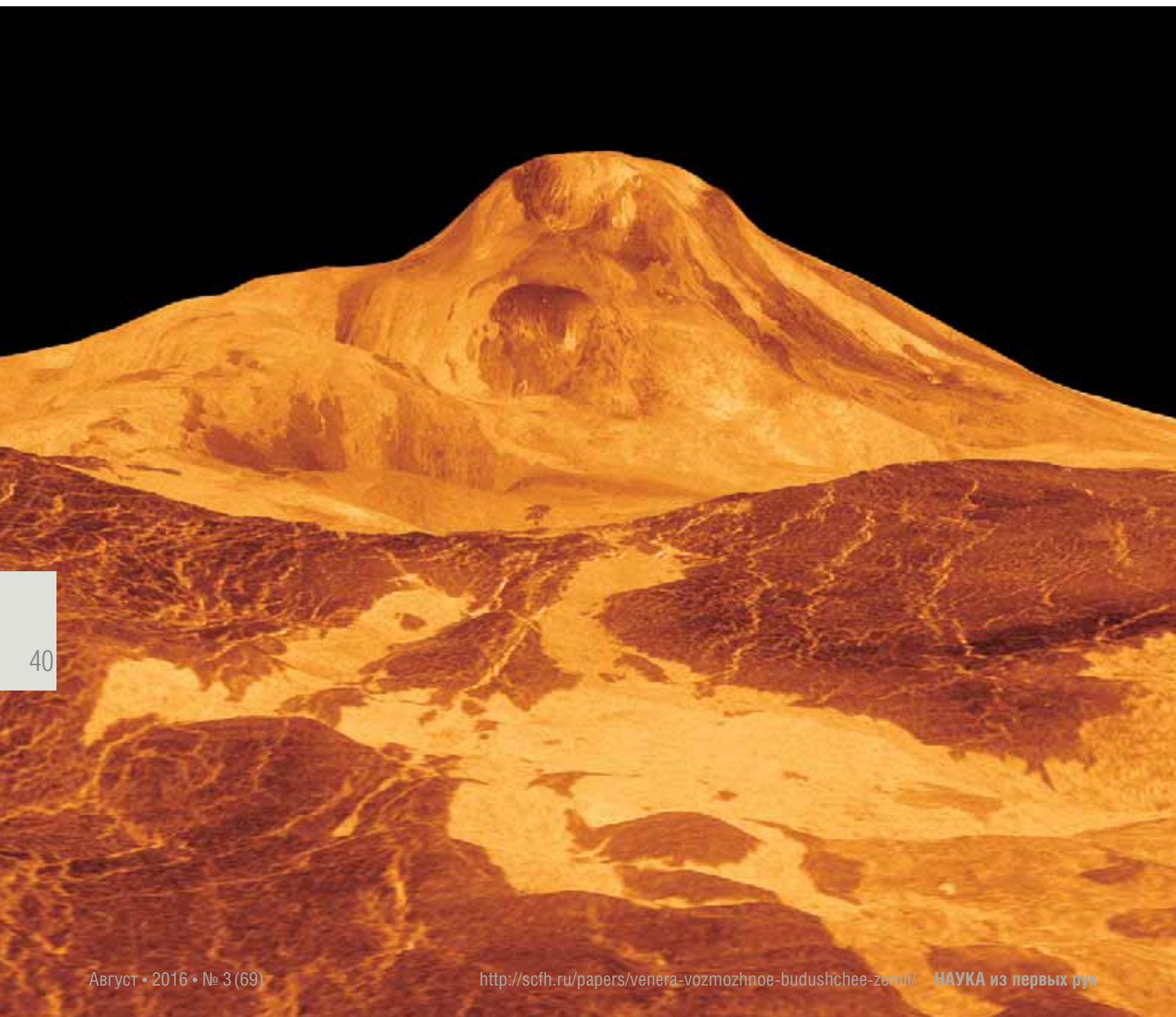


что в ближайшие 550 млн лет колебания температуры поверхности Земли продолжатся при общем тренде ее роста до значений около 30 °С. В результате к концу этого периода масса биосферы уменьшится до значений достигнутых, 2,0–2,5 млрд лет назад.

В дальнейшем температура поверхности будет быстро расти из-за увеличения размеров Солнца и степени солнечной инсоляции в результате превращения Солнца в красного гиганта. Когда температура заметно превысит 30 °С, исчезнут высшие многоклеточные организмы, а при 40 °С – все остальные эукариоты. Большинство современных видов прокариот исчезнет после рубежа в 70 °С, а при более высоких температурах – вообще все формы жизни, основанной на углеводородных цепях РНК и ДНК (Bounama *et al.*, 2014).

Разнообразные магматические структуры на поверхности Венеры: необычный вулкан Сапас с двуглавой вершиной (а); лавовое поле в области Альфа (б); радиальные дайки (в); вулкан типа «корона» – крупное валообразное поднятие, окруженное рвом-троггом (г); извилистые лавовые каналы шириной 1–2 км и длиной десятки-сотни км (д); щитовые равнины с небольшими вулканами характерной формы (е). Credit: NASA/JPL

Трехмерная модель вулкана Маат – самого высокого вулкана на Венере, возвышающегося над поверхностью планеты более чем на 8 км. Credit: NASA/JPL



Скорее всего, рост температуры на поверхности Земли продолжится, и через 1,5–1,7 млрд лет она может превысить 100 °С. Тогда начнется заключительный этап перехода к состоянию, близкому к современному на Венере. Начнут кипеть и испаряться океаны, сформируется мощный слой облачности. Из-за многократного усиления парникового эффекта нагревание поверхности Земли пойдет еще быстрее. Когда температура достигнет 400–450 °С, а давление – 50–60 атмосфер, начнется окисление керогена – рассеянной и концентрированной органики, а также *декарбонатизация*, т.е. разложение таких минералов, как доломит и карбонат кальция ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{CO}_2$). В результате взаимодействия с кремнеземом такие реакции происходят при более низких температурах, (около 450 °С) и давлении 60 атмосфер ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + 2\text{CO}_2$).

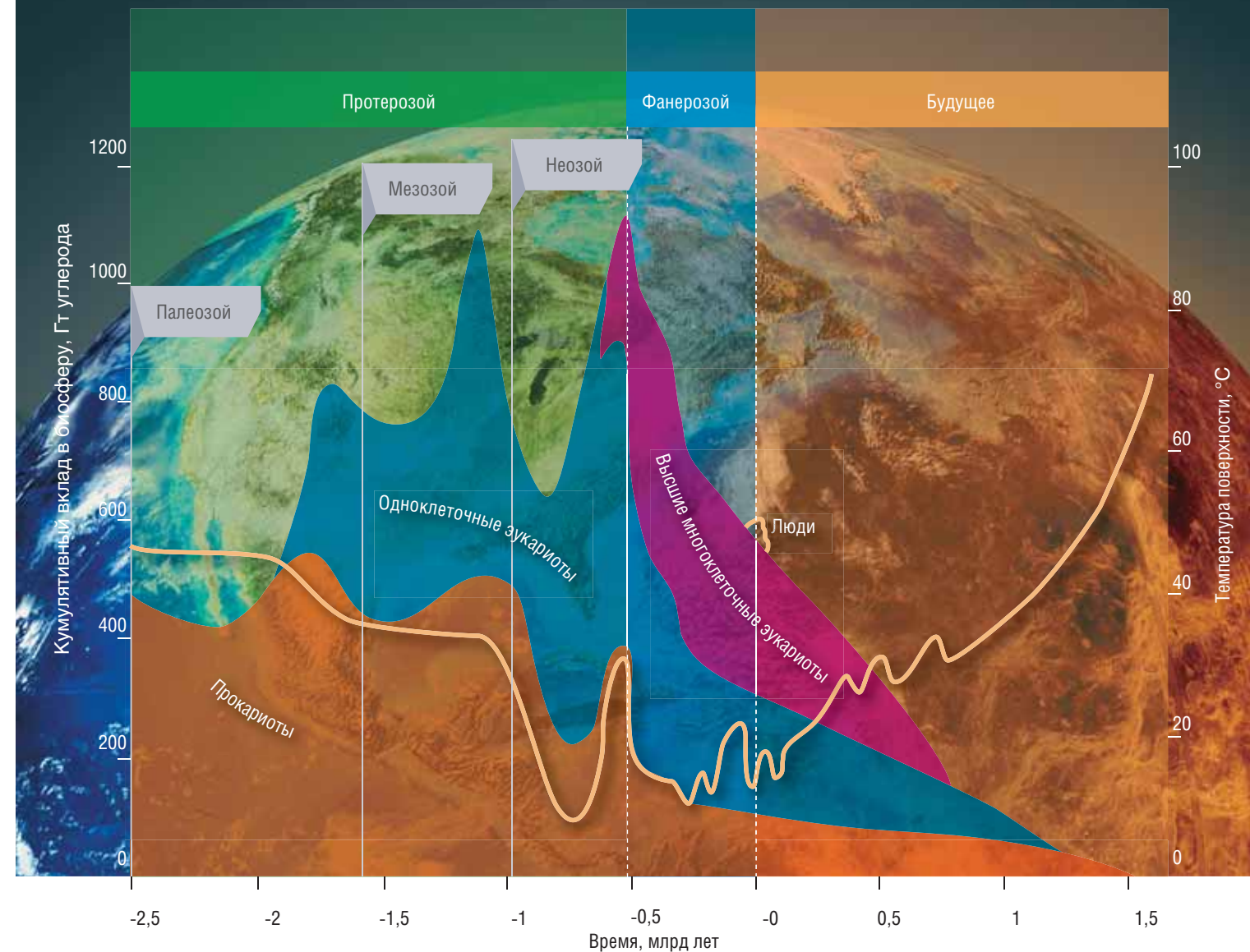
В результате кора обогатится силикатами кальция и магния, а в атмосфере будет падать содержание кислорода и нарастать содержание углекислого газа и воды, которая будет переноситься во внешнюю оболочку Земли и быстро диффундировать в космос.

Эти изменения напоминают эволюцию атмосферы Земли на ранней стадии, только «наоборот» (Добрецов, 2010, 2014). При остывании Земли ее первичная атмосфера теряла плотность, шли процессы окисления, а пары воды и углекислый газ обособлялись в виде гидросферы и карбонатных отложений. Нагревание планеты должно запустить обратные процессы, которые

приведут к росту плотности атмосферы благодаря росту концентрации углекислого газа, а также потерям свободного кислорода и воды. Что касается временных сроков, то после аккреции Земля остывала в течение 5 млрд лет, а с началом роста температуры она за 1,5 млрд лет может превратиться во вторую Венеру.

Сама Венера, находясь ближе к Солнцу, остывала медленнее и в меньшей степени. Вновь нагреваться она начала уже в начале протерозоя, т.е. около 2,5 млрд лет назад, и через 0,5–1,5 млрд лет ее атмосфера приобрела современный облик. Примерно через 6 млрд лет после образования условия на Земле и Венере вновь станут похожи, хотя эти оценки, безусловно, очень приблизительны.

Отдельного внимания заслуживает вопрос о возможностях появления биосферы на Венере в условиях, на первый взгляд кажущихся несовместимыми с жизнью. Кстати говоря, и на Земле биосфере пришлось пройти через несколько переломных моментов, продемонстрировав свою исключительную «живучесть». Считается, что жизнь на Земле окончательно закрепилась и стала развиваться около 3,9 млрд лет назад, а до этого могла возникать неоднократно, но каждый раз гибнуть в результате интенсивной метеоритной бомбардировки (Заварзин, 2009; Розанов, 2009). Земной биосфере пришлось претерпеть значительные перестройки и во время больших оледенений, а также катастрофических плюмовых извержений, таких как сибирские траппы (Hoffman,



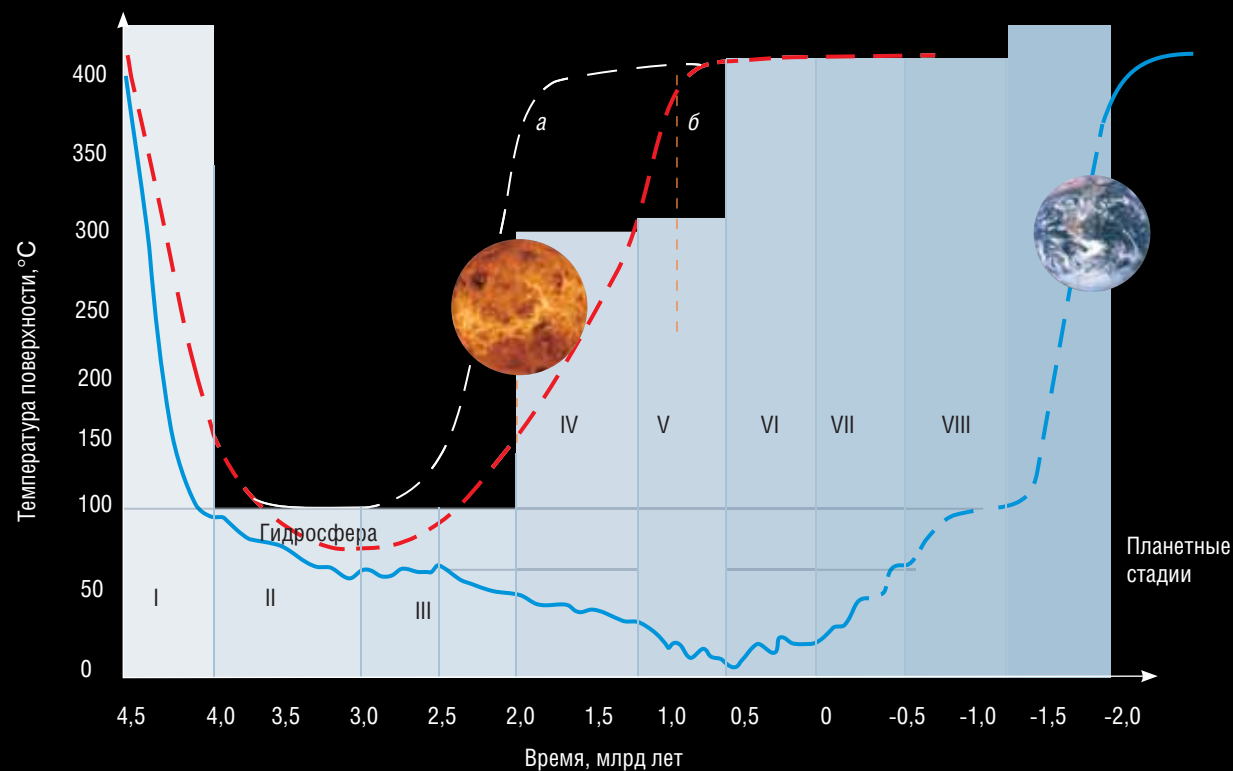
На основе знаний об эволюции биосферы Земли за последние 2,5 млрд лет, можно предположить, что разогревание планеты приведет к «обратному» ходу эволюционных процессов. Когда температура заметно превысит 30 °С, исчезнут все высшие многоклеточные организмы, а через 400–500 млн лет общая масса биосферы, выраженная в гигатоннах углерода, упадет примерно вдвое. Через 750 млн лет исчезнут все эукариотические организмы, а еще через 1,5 млрд лет – все существующие ныне прокариоты (бактерии и археи).
По: (Boynata et al., 2004), с добавлениями автора (Добрецов, 2009)

Монтаж из снимков планет Солнечной системы и четырех спутников Юпитера, сделанных американскими космическими аппаратами «Вояджер». Credit: NASA

Schred, 2002; Maruyama, Liou, 2005; Wignall, 2007; Добрецов, 2009; Sobolev et al., 2011).

На Венере же на ранних стадиях «параллельная» эволюция жизни и поверхности планеты могла идти долго и постепенно, и такие простейшие организмы, как бактерии, могли потом эмигрировать с поверхности в облачный слой, где есть вода и необходимые для жизни элементы. При этом бактерии могли концентрироваться на участках с пониженным уровнем H_2SO_4 и даже активно поддерживать этот уровень, используя энергию Солнца. Одним из косвенных доказательств существования на Венере живых организмов является обнаружение в ее облаках карбонильного сульфида CO(S) , который образуется на Земле под каталитическим воздействием бактерий (David, 2003).

Что касается возможного будущего Земли, то при самом неблагоприятном развитии «венерианского» сценария люди могут заблаговременно переселиться на Луну



Современная атмосфера Венеры сформировалась, судя по разным оценкам, 1 или 2 млрд лет назад (а и б соответственно). На основе результатов моделирования изменений температуры поверхности Земли и Венеры в прошлом и будущем можно предположить, что остывание Земли после процесса аккреции продолжится в течение 5 млрд лет, а ее существенное нагревание начнется через 500 млн лет, считая от настоящего времени. В результате через 1,5 млрд лет после начала нагревания Земля может достигнуть состояния, близкого к современной Венере.

По: (Greenspoon, 1998; Bortman, 2004; Bounama et al., 2004; Розанов, 2009; Добрецов, 2009)

Двуглавая гора Сапас – один из самых зрелищных крупных вулканов Венеры с диаметром подножия около 400 км. Гора увенчана двумя кратерами, а ее склоны покрыты застывшими переплетающимися лавовыми потоками, некоторые из которых могли образоваться раньше вершин.
Credit: NASA/JPL

Когда Венера находится точно между Солнцем и Землей, можно наблюдать редкое астрономическое явление – «транзит Венеры», своего рода солнечное затмение, когда Венера перемещается по диску Солнца в виде маленького черного пятнышка.
Credit: NASA

или Марс, а бактерии – мигрировать в облачный слой, как это, вероятно, и произошло на Венере. Кстати сказать, и сейчас в земных облаках обнаруживаются вполне жизнеспособные специфические бактерии (Landis, 2003; David, 2003). Самым же фантастическим исходом можно считать возникновение на Земле альтернативной углеродно-кислородной формы жизни при переходе углерода в четверную координацию – «тетраэдрную», как у алмаза, и появление углеродно-кислородных цепочек, схожих с силикатными из пироксенов и амфиболов, которые содержат азот и фосфор и устойчивы при высокой температуре. Теоретически предсказано, что такая координация углерода может возникать при очень высоких давлениях, но не исключено, что в живых организмах она может существовать и в более мягких условиях. Но это, конечно, пока только предварительные идеи...

Литература

Адушкин В.В., Витязев А.В. Происхождение и эволюция Земли, современный взгляд // *Вестн. РАН*. 2007. Т. 77, № 5. С. 396–400.

Добрецов Н.Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 6. С. 761–784.

Жарков В.И. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука и образование, 2013. 414 с.

Засова Л.В., Морозов В.Н., Минкин В.И., Майоров Б.С. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км высоты // *Космические исследования*. 2006. № 44. С. 381–400.

Проблемы происхождения жизни. РАН, М.: ПИИ, 2009. С. 168–184.

Bortman H. Was Venus alive? The signs and probably there // *Astro-biology Mag.* 2004. N 8.

Bounama C., Blok W. von, Franck S. Das Ende des Raumschiffs Erde // *Spectrum der Wissenschaft*. October. 2004. P. 100–104.

Ernst R.E. Large igneous provinces. Cambridge Univ. Press. 2014. P. 653.

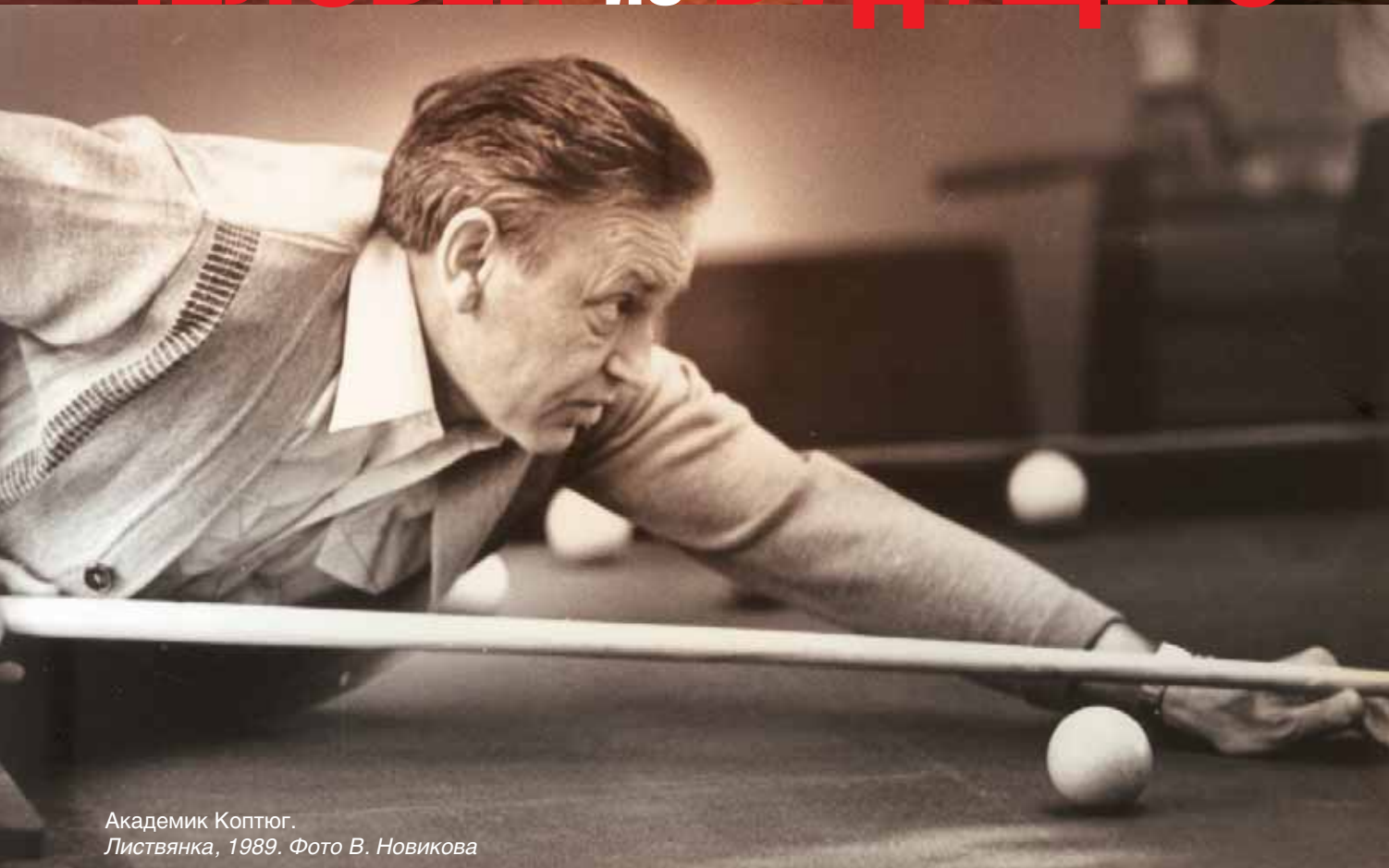
Grinspoon D. Venus Revealed: A new Look below the clouds // *Reading Mass.* 1998. ISBN 978 – 0201328394.

Head J. W. The geologic evolution of Venus: insights into Earth history // *Geology*. 2014. V. 42. P. 95–96.

Svedhem H., Titov D. V., Taylor F. C., Witasewo. Venus a more Earth like planet // *Nature*. 2007. V. 450. P. 629–632.

Wignall P.B. The link between large igneous province eruptions and mass extinction // *Elements*. 2005. V. 1. P. 293–297.

ЧЕЛОВЕК ИЗ БУДУЩЕГО



Академик Коптюг.
Листвянка, 1989. Фото В. Новикова

Двадцать лет назад, в октябре 1996 г. ЮНЕСКО приняло решение о включении в список объектов Всемирного природного наследия озера Байкал, который стал одной из первых особо охраняемых природных территорий международного значения в России. Вопрос о придании озеру Байкал мирового статуса был впервые поднят на Консультативном совете ООН по устойчивому развитию (1994 г.) академиком Валентином Афанасьевичем Коптюгом, который в то время возглавлял Сибирское отделение АН СССР и пользовался международным признанием как один из наиболее компетентных российских специалистов по вопросам устойчивого развития человеческого сообщества и охране окружающей среды. Такой высокий авторитет В. А. Коптюга определялся не только его высочайшим профессионализмом ученого, но и широким комплексом экологических исследований, проводимых институтами СО РАН, среди которых проблемы Байкала всегда занимали особое место. После скоропостижного ухода Валентина Афанасьевича из жизни в 1997 г. эта деятельность по многим направлениям была приостановлена.

9 июня 2016 г. академику Валентину Афанасьевичу Коптюгу исполнилось бы 85 лет...

«Чтобы описать все, что сделал академик В. А. Коптюг для Байкала, потребуется отдельный большой том... В этом вопросе он проявил себя как блестящий теоретик и талантливый менеджер-практик, который всегда находил нетривиальные решения по самым сложным вопросам»

К.Г.-м.н. В.Д. Ермиков,
начальник Управления
организации научных
исследований
СО АН СССР/РАН
с 1985 по 2009 гг.

«Ученые, так же как руководители государств, общество и каждый из нас, должны ... прокладывать человечеству путь в управляемое разумом будущее».

В. А. Коптюг, 1995 г.

К юбилею В. А. Коптюга

В. А. Коптюг (1993, 1996):

«С моей точки зрения, интеллигенция сыграет важную роль в реализации реформ, которые действительно необходимы России, если у ее представителей будет четкая, мужественная, гражданская позиция, если она не будет остерегаться высказывать свои убеждения, основанные на более обширных знаниях, более широком кругозоре, чем у других слоев общества, и осознанно сделает свой исторический выбор»

«К сожалению, Российская академия наук пока не заняла активной позиции в определении национальной стратегии развития. Это привело к тому, что основой подготовки государственных решений во многих случаях становились не фундаментальные знания, а амбиции, волюнтаризм, а порой и корыстные интересы»

«Не следует думать, что движение человечества к устойчивому развитию будет бесконфликтным. Наоборот, наше время и ближайшие десятилетия будут периодами острейшей борьбы на мировой арене за ресурсы, экологический резерв и интеллектуальный потенциал»

Ночной Байкал. Фото В. Короткоручко

Академик РАН Н.Л. Добрецов: «Предметом постоянной заботы Валентина Афанасьевича являлось научное обеспечение охраны окружающей среды. Он последовательно боролся с проектом переброски сибирских рек на юг и за чистоту Байкала, участвовал в организации всесторонней экспертизы строительства сибирских ГЭС и крупных промышленных объектов. Он всегда имел мужество защищать свою позицию не только перед руководством страны, но и перед общественностью. После участия летом 1992 г. в работе Конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро он стал последовательным и на первом этапе едва ли не единственным в России сторонником и пропагандистом новой парадигмы устойчивого развития человечества.

В 1994 г. генеральный секретарь ООН Бутрос Гали пригласил Коптюга (единственного от России!) в числе 20 других видных ученых и общественных деятелей мира в Консультативный совет по устойчивому развитию. Коптюг выдвинул там, в частности, идею выделить в ряде стран территории, которые могли бы стать модельными образцами устойчивого развития, и предложил объявить такой территорией в России Байкальский регион. В результате интенсивной работы институтов СО РАН вместе с представителями ЮНЕСКО оз. Байкал в 1996 г. было включено в список Участков мирового природного наследия, признано не только национальным, но и мировым достоянием» (*Уроки Коптюга // Наука из первых рук. 2011. № 2(38). С. 8—20.*)

В.А. Коптюг (1996): «На своем непростом жизненном пути я встречал много честных людей, истинных граждан, патриотов своей страны. Знаю, в научной и преподавательской среде тоже много мерзавцев, но честных людей больше. На них и держится Россия в широком понимании этого слова-символа»



Валентин Афанасьевич КОПТЮГ приехал в строящийся новосибирский Академгородок в 1960 г., где прошел все ступени – от младшего научного сотрудника до директора института и вице-президента АН СССР/РАН. Уже в 37 лет он был избран членом-корреспондентом, а в 48 – действительным членом Академии наук СССР. В. А. Коптюг внес огромный вклад в развитие физической, синтетической и прикладной органической химии; основал крупные научные школы. Семнадцать лет В. А. Коптюг возглавлял Сибирское отделение Академии наук – почти столько же, сколько и его основатель М. А. Лаврентьев: кривая капитальных вложений в Сибирском отделении имеет два максимума – «пик Лаврентьева» (1960–1970) и «пик Коптюга» (1987–1991), отражающий интенсивное строительство в региональных научных центрах. Почти четверть века В. А. Коптюг проработал в ведущих научных организациях мира, в том числе был президентом Международного союза по теоретической и прикладной химии (IUPAC) и вице-президентом Научного комитета по проблемам окружающей среды Международного совета научных союзов (SCOPE ICSU)

Академик РАН М. А. Грачев: «В последние десять лет своей жизни Валентин Афанасьевич уделял большое внимание проблемам озера Байкал и занимался ими так же ответственно, как фундаментальной наукой и своими административными обязанностями. Забегая вперед, скажу, что эта деятельность, как мне кажется, в итоге привела его к важным философским обобщениям. С его точкой зрения можно спорить, но он искренне считал, что проблема «охраны природы» в сущности является проблемой устойчивого развития человечества. <...>

В 1985–1986 гг. Президиум СО АН одержал крупную политическую победу – принципиально было решено принять специальное Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «Об охране озера Байкал». Правительственные и партийные руководители полагались на авторитет Сибирского отделения. Постановление начали готовить, но специалистам из Госплана СССР и отраслевых министерств и ведомств нужны были твердые цифры и факты.

Валентин Афанасьевич отдал распоряжение о предоставлении ему всех соответствующих отчетов Лимнологического института и других организаций Сибирского отделения и, как всегда, стал их лично во всех деталях изучать и оценивать... Переработав, как Маяковский, «тысячу тонн словесной руды», он, тем не менее, смог извлечь такой объем информации, который позволил убедить всех участников Государственной комиссии в необходимости принятия постановления. Оно и было принято в 1987 г. Комбинат, к сожалению, закрыть не удалось, зато была сделана масса других полезных дел: ликвидирован один из самых грязных цехов Байкальского комбината по производству кормовых дрожжей, прекращены рубки главного пользования в окрестностях Байкала, запрещена перевозка древесины по озеру в плотах. На Селенгинском целлюлозно-картонном комбинате впервые в мировой практике был создан замкнутый цикл водопотребления. <...>

С 1987 г., когда я переехал в Иркутск, мои контакты с Валентином Афанасьевичем по проблемам Байкала стали регулярными. Под его непосредственным присмотром были написаны и согласованы со всеми ведомствами «Нормы допустимых воздействий на экологическую систему озера Байкал». На создание «Норм» был отведен очень короткий срок – всего шесть месяцев, но их разработка и принятие были делом чести Сибирского отделения. Я думаю, что многие явные и тайные оппоненты идеи особой охраны Байкала довольно потирали руки, думая, что «академики» никак не успеют обосновать нормативы. Они хотели знать, сколько грязи наука разрешит им вылить в Байкал так, чтобы ничего ему от этого не сделалось, а уж дальше они сами распределили бы разрешения на выбросы и сбросы между предприятиями по своему усмотрению. <...> В наших «Нормах» наряду со списком веществ, сбрасывать ко-

«Мне довелось руководить международной программой по бурению донных отложений на оз. Байкал, что позволило установить изменения палеоклимата в обширном регионе за последние 8–10 млн лет. В этих работах участвовал ряд ученых США, Японии и России, а их реализация требовала ежегодно около 0,8–1,0 млн долл. В. А. Коптюг, который был членом Консультативного совета по устойчивому развитию при генеральном секретаре ООН, активно поддерживал эти исследования, способствовавшие повышению значимости российской науки в решении вопросов глобальной экологии»

Академик М. И. Кузьмин

торые в Байкал совсем нельзя (ПДК = 0), был предложен принципиально другой подход – заставить предприятия, работающие вблизи Байкала, достигнуть по экологическим показателям наилучших известных в мировой практике параметров, внедрить совершенные природоохранные технологии.

Валентин Афанасьевич однозначно поддержал идею экологической паспортизации предприятий Байкальского региона. В состав каждого паспорта в качестве обязательного компонента входил полный обзор научной и инженерной литературы по предприятиям тех же отраслей разных стран мира, а также предлагаемый предприятием план достижения мирового уровня по выбросам и сбросам. «Нормы» были приняты и утверждены правительством в установленный срок, а в дальнейшем внедрены в Байкальском регионе и принесли немало пользы.

При поддержке и во многом по инициативе Коптюга в 1990 г. был создан Байкальский международный центр экологических исследований – организация с весьма «знатными» иностранными учредителями, например, Лондонским королевским обществом. Это потребовало от Валентина Афанасьевича огромного дипломатического искусства. В 1990–2000 гг. благодаря Центру на Байкале совместно с российскими учеными были проведены международные экспедиции и исследования с участием более тысячи иностранных ученых и специалистов. <...>

В 1999 г. был принят Закон РФ «Об охране озера Байкал», концепция которого тоже разработана Сибирским отделением. Это означает, что озеро наконец-то получило правовую защиту – до принятия решения ЮНЕСКО и Закона этот уникальный водоем мира юридически имел те же права, что и любое из десятков тысяч российских озер. Объем научных знаний о Байкале существенно вырос, точность данных повысилась многократно. К сожалению, Валентин Афанасьевич не успел добиться реализации проекта репрофилирования БЦБК на экологически безопасное производство. В последний раз он горячо защищал предложенную Сибирским отделением и другими организациями программу репрофилирования на заседании Правительственной комиссии по Байкалу за день до своей смерти.

В заключение не могу не сказать о следующем. Как мне кажется, мне не свойственно становиться перед начальством по стойке «смирно» и беспрекословно выполнять приказы, если я не согласен с их правильностью. Удивительно, что много раз я внутренне не соглашался с указаниями Валентина Афанасьевича даже после детального обсуждения проблем. Тем не менее мне никогда даже не приходило в голову их саботировать. Я думаю, что такие же чувства не раз испытывали и многие другие его бывшие подчиненные. Не соглашаясь с ним и споря, я в конце концов просто начинал верить, что он видит намного дальше и лучше, чем я. Гарантией были его огромная эрудиция, абсолютная честность, принципиальность, умение предвидеть поведение людей, с огромным терпением и тактом добиваться поставленных целей» (Под знаком сигмы // Эпоха Коптюга. 2001. С. 144–151).



В.А. Коптюг (1995):

«Совершенно очевидно, что образование, культура, наука – это краеугольные камни будущего развития. Страна, которая недооценивает роль этих трех сфер, обречена на прозябание в будущем индустриальном мире. По отношению государства к этим трем сферам легко представить себе будущее государства»

Ключевые слова: В. А. Коптюг, Всемирное природное наследие, Байкал, устойчивое развитие.
Key Words: V. A. Koptiug, World Heritage, Baikal, sustainable development

Фото В. Короткоручко

«Пришельцы»



БАЙКАЛА

Изучение глубинной биосферы началось в 1968 г., когда специально оборудованный американский корабль *Glomar Challenger* пробурил свою первую скважину в глубинах Мексиканского залива, а продолжилось в рамках международных проектов глубоководного бурения с участием нового бурового судна с символическим именем *JOIDES* Resolution*, названного в честь парусника знаменитого мореплавателя XVIII в. Джеймса Кука.

Идею о существовании жизни в недрах нашей планеты впервые выдвинул еще в конце XIX в. знаменитый писатель Жюль Верн. Его герои во главе с профессором Лиденброком на снаряжении отправились в «путешествие к центру Земли», обнаружив там не только динозавров и первобытного человека, но и огромный подземный океан. В своем научно-фантастическом романе великий фантаст, которого сегодня называют провидцем, вновь предсказал будущее – столетие спустя с помощью глубоководного бурения под океаническим дном действительно была обнаружена жизнь. Правда это оказались не доисторические ящеры, а обитающие в «океане» поровой воды микроорганизмы с уникальным метаболизмом, способные существовать в практически «неземных» условиях

Глубинная биосфера, верхняя граница которой располагается на глубине одного метра от поверхности морского дна, по своей протяженности и объему соперничает только с водной толщей Мирового океана, хотя с ростом глубины условия для жизни ужесточаются. Источником энергии и вещества для микроскопических обитателей подземной бездны служит готовая органика, а также горячие потоки газонасыщенных флюидов из глубоких горизонтов литосферы.

По: (Bell, Heuer, 2012)

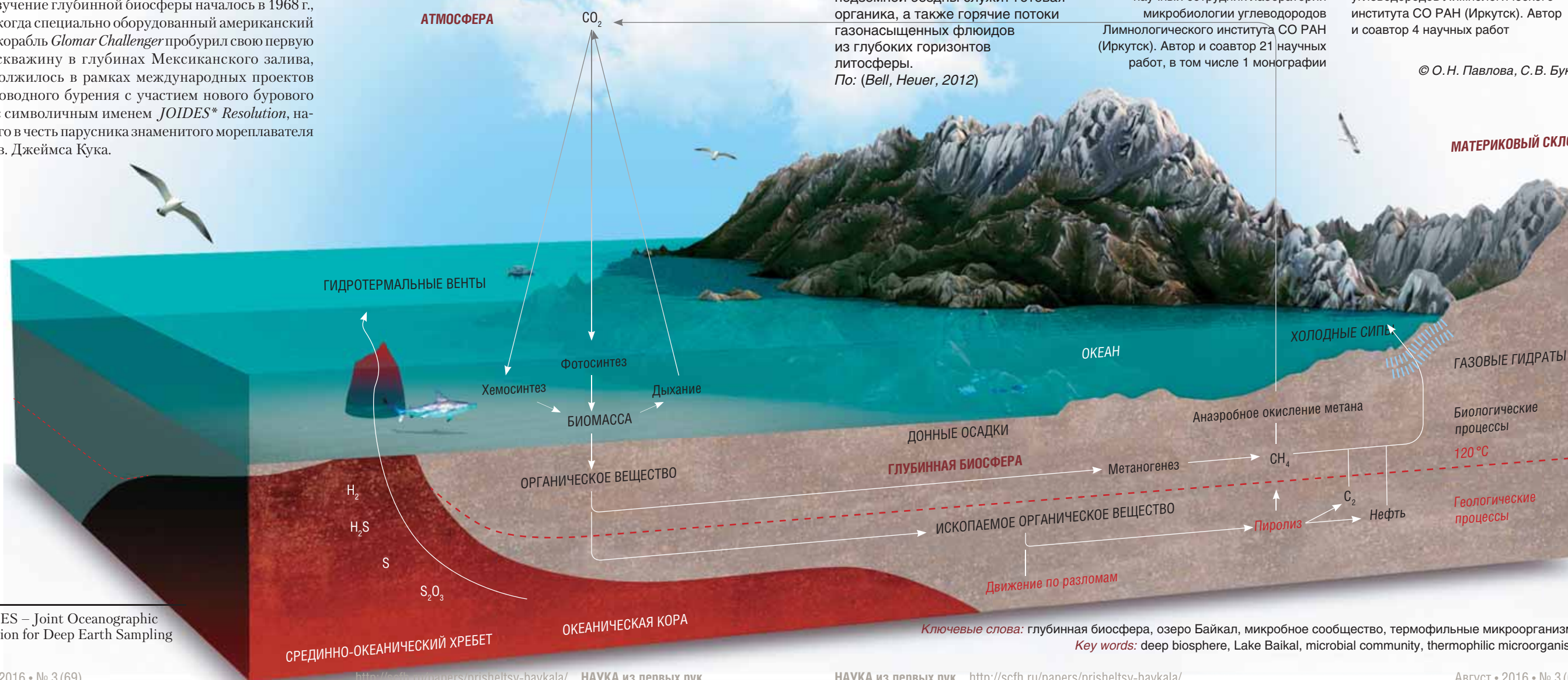


ПАВЛОВА Ольга Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории микробиологии углеводородов Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 21 научных работ, в том числе 1 монографии



БУКИН Сергей Викторович – аспирант лаборатории микробиологии углеводородов Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 4 научных работ

© О.Н. Павлова, С.В. Букин



* JOIDES – Joint Oceanographic Institution for Deep Earth Sampling

Ключевые слова: глубинная биосфера, озеро Байкал, микробное сообщество, термофильные микроорганизмы.
Key words: deep biosphere, Lake Baikal, microbial community, thermophilic microorganisms

Программы глубоководного исследования включали изучение химии вод, содержащихся в глубинных донных осадках. На основе определения скоростей реакций в этих поровых водах было выдвинуто предположение, что в толще донных отложений обитают активные живые бактерии, которые используют окислительно-восстановительные реакции для получения энергии, необходимой для жизнедеятельности. В конце 1980-х гг. начались микробиологические исследования глубинных морских осадков, давшие поразительные результаты (Bell, Neuer, 2012).

В конце прошлого века были получены первые данные о профилях активности, общей численности и разнообразии форм микроорганизмов в глубинных слоях морских осадочных отложений, которые стали реальным доказательством в пользу гипотезы о существовании глубинной биосферы (Cragg *et al.*, 1990; Gold, 1992). Само это понятие – *глубинная биосфера* (*deep biosphere*) – появилось позднее. Сейчас под этим словом мы понимаем огромную экосистему осадочных отложений ниже морского дна, включающую различные микроорганизмы (бактерии, археи и грибы) с активным метаболизмом и размножением.

Экстремальное разнообразие

Где же начинается глубинная биосфера? Судя по результатам большинства исследований, ее верхняя граница начинается на уровне 1 м ниже дна, а по своей протяженности и объему она соперничает лишь с водной толщей Мирового океана. До сих пор не было обнаружено образцов глубинных осадков, в которых бы отсутствовала жизнь. По некоторым оценкам, биомасса микроорганизмов глубинной биосферы достигает 70% от биомассы всех микроскопических обитателей донных осадков, включая верхние горизонты (Whitman *et al.*, 1998; Parkes *et al.*, 2014).

С возрастанием глубины залегания осадков условия жизни их обитателей ужесточаются из-за роста давления и температуры, которая достигает 60–100 °С, а также практически полного отсутствия кислорода. С точки зрения обитателя поверхностных слоев осадочной и водной толщи, такие условия являются экстремальными, тем не менее микробная жизнь в глубинных отложениях достаточно разнообразна, хотя характеристика и состав микробного сообщества с глубиной постепенно меняются.

На сегодня микроорганизмы – бактерии и археи – обнаружены в морских донных отложениях на глубинах более 1,6 км ниже уровня дна, а прямое измерение активности клеток свидетельствует о наличии жизнеспособных микроорганизмов в осадках возрастом свыше 16 млн лет (Roussel *et al.*, 2008; Ciobanu *et al.*, 2013; Schippers *et al.*, 2005). Молекулярно-генетические

исследования глубинных осадочных отложений различных районов Мирового океана указывают на большое разнообразие существующих там микробных сообществ, значительную часть которых составляют уникальные и (или) так называемые некультивируемые микроорганизмы, которые не удается выращивать в лабораторных условиях (Orcutt *et al.*, 2011). Сами микроорганизмы и их ДНК обнаруживаются не только в толще морских осадков, но и под поверхностью суши в резервуарах углеводородов и водоносных слоев, залегающих на глубинах нескольких километров.

Однако существуют места, где глубинная биосфера «соприкасается» с поверхностной, – это зоны повышенной тектонической активности, где из «горячих» глубинных горизонтов осадков или базальтового слоя земной коры идут потоки газов и флюидов – дополнительные источники углерода и энергии (Boetius, Wenzhöfer, 2013). Восходящие потоки водорода, ацетата, а также метана и других углеводородов, образующиеся в глубине донных отложений, увлекают в верхние горизонты и их микроскопических обитателей (Hubert *et al.*, 2009).

Одним из таких мест является Байкал – самое глубокое пресноводное озеро нашей планеты, в донных отложениях которого были обнаружены выходы нефти и газосодержащих флюидов, грязевые вулканы и залежи метановых газогидратов. Судя по имеющимся на сегодня данным, в отдельных районах озера миграция нефти и газов к поверхности дна происходит с глубин 2–7 км, характеризующихся термобарическими условиями (Конторович и др., 2007; Хлыстов и др., 2013). Аномально высокие концентрации отдельных ионов в составе поровых вод поверхностных осадков в таких зонах могут быть следствием прохождения через них высокоминерализованных глубинных флюидов (Гранина и др., 2001; Погодаева и др., 2007). Этот вывод подтверждается и присутствием в верхних слоях донных отложений грязевых вулканов створок древних диатомовых водорослей, которые в районах со спокойным осадконакоплением залегают на глубинах 300 м (Bradbury *et al.*, 1994; Клеркс и др., 2003).

Все эти данные свидетельствуют о том, что в районах глубоководных разгрузок на Байкале в холодные (около 4 °С) поверхностные осадочные горизонты вместе с потоками донных отложений могут попадать представители глубинного термофильного микробного сообщества.

Хвойный маркер из диатомовых водорослей

Экспериментальные исследования глубинной биоты осадочной толщи Байкала в зонах разгрузок углеводородов, где идут процессы преобразования



Глубоководное бурение на оз. Байкал начало проводиться в рамках Международной программы «Байкал–бурение», в которой участвовали российские, американские и японские исследователи. В 1993 г. в районе Бугульдейской перемычки была пробурена первая 100-метровая скважина, а три года спустя с помощью бурения на Академическом хребте в озерных осадках было исследовано распределение органического углерода и биогенного кремнезема диатомовых водорослей, а также получены первые данные о разнообразии глубинных прокариотических микроорганизмов (Кузьмин и др., 2000)

органического вещества микробным сообществом, проводятся в лаборатории микробиологии углеводородов Лимнологического института СО РАН (Иркутск) под руководством д.б.н. Т.И. Земской начиная с 2012 г.

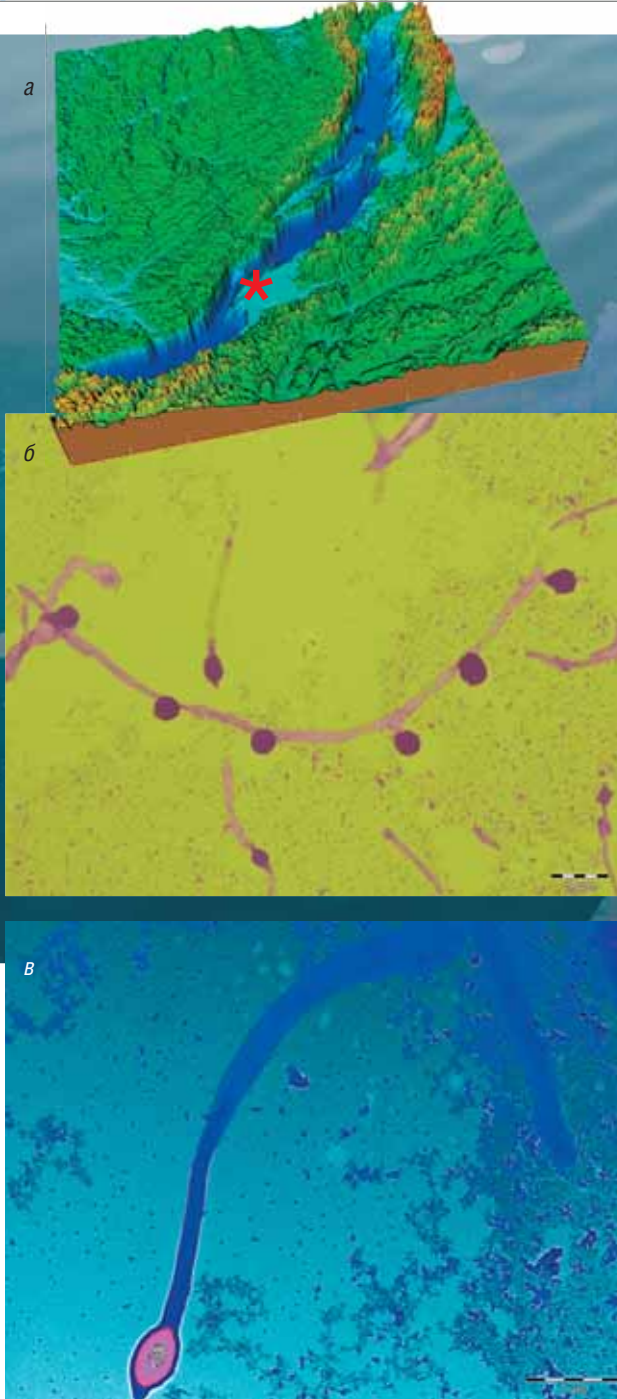
Эксперименты ведутся при температуре 80 °С и давлении 49,5 атмосферы – такие условия характерны для тектонически активной зоны Байкала. Для этого используются специальные автоклавы для непрерывного культивирования микроорганизмов в газовой среде, с автоматическим регулированием давления и температуры, разработанные и смонтированные в Институте неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН (Новосибирск). В эти автоклавы помещали «расфасованные» в стерильные стаканы образцы донных осадков, обогащенных биомассой безбактериальной культуры диатомовой водоросли *Synedra acus*, и культивировали при высокой температуре и давлении.

За 11 месяцев эксперимента органическое вещество донных осадков было преобразовано на 17,4%. Анализ исходного и конечного вещества в лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (Новосибирск) показал, что в результате эксперимента в нем уменьшилось содержание органического углерода и битумоида, но появился новый компонент – трициклический ароматический углеводород *ретен*. Это очень неожиданный результат, так как этот углеводород

обычно используется в качестве биомаркера биомассы хвойных растений. Образование ретена в условиях эксперимента доказывает, что этот углеводород может синтезироваться в процессе деструкции биомассы диатомовых водорослей, осуществляемых микробным сообществом глубинных донных осадков Байкала.

В донном осадке после эксперимента был также обнаружен широкий спектр нуклеотидных последовательностей. Анализ с использованием популярного генетического маркера – фрагмента гена 16S рРНК, кодирующего один из белковых компонентов бактериальной рибосомы, – показал, что они принадлежат микроорганизмам с различным метаболизмом: пурпурным несерным бактериям, способным к росту в анаэробных условиях за счет окисления органических соединений; морским и пресноводным углеводородокисляющим микроорганизмам; анаэробным некультивируемым метанотрофам, а также уникальным бактериям, филогенетический статус которых в настоящее время не определен.

Длительное культивирование донных осадков способствовало размножению в накопительной культуре ряда жизнеспособных термофильных микроорганизмов. Один из них – термофильный факультативный анаэроб рода *Paracoccus*, который характеризуется *миксотрофным* (смешанным) метаболизмом, т.е. способен расти как в присутствии «готовой» органики, так и молеку-



Первоначально накопительная (смешанная) культура микроорганизмов, полученная при культивировании осадков Посольской банки (а), была представлена двумя морфологическими формами: длинными тонкими клетками со спорами на концах и мицелиальными образованиями, также со спорами (б). В дальнейшем первая форма была классифицирована как гипертермофильная бактерия рода *Thermaerobacter*, а вторая – термофильный актиномицет рода *Planifilum*. Ближайший родственник байкальского актиномицета – *Planifilum yunnanense* – обнаружен в горячих источниках китайской провинции Юньнань. К сожалению, в чистой культуре этот байкальский клон культивировать не удалось.

Что касается *Thermaerobacter*, то в настоящее время описано всего пять видов этого рода, а его первый представитель был выделен из осадков грязевого вулкана в Марианской впадине с глубины 10 897 м. Байкальский представитель (в) имеет оптимум роста 70 °С, несмотря на то что температура донных осадков озера Байкал ~ 4 °С, а по своим свойствам значительно отличается от родственников: он способен расти как в аэробных, так и анаэробных условиях, хотя другие штаммы являются строгими аэробами, однако споры образует только при отсутствии кислорода.

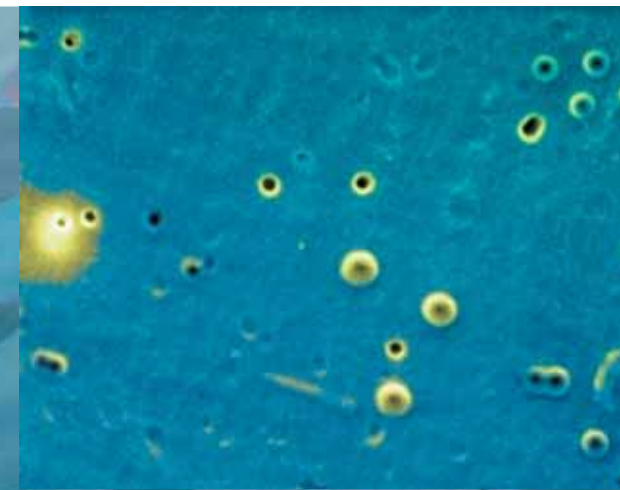
Трансмиссионная электронная микроскопия. ЦКП «Ультрамикроанализ» (Иркутск).

3D-изображение рельефа дна Байкала и окружающей местности создано в рамках проекта «A New Bathymetric Map of Lake Baikal», 2002. © the INTAS Project 99-1669 Team, October 2002

лярного водорода и углекислого газа. Такие свойства позволяют отнести этот штамм к числу вероятных участников процесса преобразования органического вещества в глубинных донных осадках Байкала.

Дальнейшее культивирование при температуре 60 °С позволило выявить другие виды термофильных микроорганизмов: актиномицеты рода *Planifilum* и бактерии рода *Thermaerobacter*. Последний интересен тем, что первый представитель этого рода был выделен с глубины 10 897 м из осадков грязевого вулкана «Бездна Челленджера», расположенного в Марианской впадине – одном из самых загадочных и неизведанных мест нашей планеты.

Глубинные микроорганизмы Байкала оказались не менее таинственными, чем обитатели знаменитой Марианской впадины. С одной стороны, они имеют высокий процент сходства с бактериями и археями, которые встречаются в горячих источниках, подповерхностных осадках, осадках и почвах, загрязненных углеводородами, а также в гидрат содержащих глубинных донных отложениях морских экосистем. Так же как эти микроорганизмы, они существуют за счет гидрогенотрофного метаногенеза и H₂-зависимого



Байкальский термофильный факультативный анаэроб рода *Paracoccus*, выделенный из донных осадков оз. Байкал, образовывал на плотных средах мелкие колонии размером 1–2 мм, состоящие из парных или одиночных клеток диаметром 0,5 мкм. Его способность утилизировать пептон (частично гидролизированный белок) и дрожжевой экстракт, а также расти на минеральной среде в присутствии H₂ и CO₂ доказывает, что он также обладает микотрофным метаболизмом, как и его известные почвенные «родственники».

Сканирующая электронная микроскопия. ЦКП «Ультрамикроанализ» (Иркутск)

разложения захороненного органического вещества. С другой стороны, анализ суммарной ДНК из осадков выявил наличие в них уникальных клонов, о путях метаболизма которых мы можем пока только гадать.

Особый интерес вызывает способность глубинных байкальских микроорганизмов синтезировать ретен. Как известно, байкальские нефти имеют «молодой» возраст и считаются уникальными из-за большого набора «ископаемых» молекул (*хемифоссилий*), таких как сесквитерпаны, стераны, секогепаны, олеанан и др. (Конторович и др., 2007). Как показывают наши данные, теперь к списку биомаркеров байкальской нефти можно добавить и ретен.

Эти результаты свидетельствуют о том, что исследования микроорганизмов, поступающих из глубинной зоны Байкала, могут быть информативны для установления источников образования ископаемых углеводородов и оценки роли микроорганизмов в процессах их образования и деструкции. Кроме того, учитывая то, что ретен обычно используется в качестве биомаркера хвойных растений при изучении изменений биологических сообществ в недавнем прошлом, эти данные дают возможность более корректно интерпретировать процессы, происходившие в далекие эпохи.

Бактерии рода *Paracoccus* – пример микроорганизмов с микотрофным (смешанным) метаболизмом, способных питаться как готовыми органическими, так и неорганическими веществами. По строению электрон-транспортной цепи они близки к митохондриям – внутриклеточным органеллам высших организмов, которые ведут свое происхождение от симбиотических бактерий. Эти особенности позволяют им выживать при различных концентрациях кислорода, «переключаясь» с кислородного (аэробного) на бескислородный (анаэробный) метаболизм (Baker et al., 1998)

Литература

Гранина Л.Э., Каллендер Е., Ломоносов И. С. и др. Аномалии состава поровых вод донных осадков Байкала // *Геология и геофизика*. 2001. Т. 42, № 1–2. С. 362–372.

Конторович А.Э., Каширцев В.А., Москвин В.И. и др. Нефтегазоносность отложений оз. Байкал // *Геология и геофизика*. 2007. Т. 48, № 12. С. 1346–1356.

Кузьмин М.И. Байкальский проект: основные результаты реализации // *Вестн. РАН*. 2000. Т. 7, № 2. С. 109–116.

Погодаева Т.В., Земская Т.И., Голобокова Л.П. и др. Особенности химического состава поровых вод донных отложений различных районов озера Байкал // *Геология и геофизика*. 2007. Т. 48, № 11. С. 1144–1160.

Bell E.M., Heuer V.B. The Deep Biosphere: Deep Subterranean and Seafloor Habitats // *Life at Extremes: Environments, Organisms and Strategies for Survival* (ed. E.M. Bell). CAB Intern. 2012. P. 554

Cragg B.A., Parkes R.J., Fry J.C. et al. Bacterial biomass and activity profiles within deep sediment layers // *Proc. Oce. Drill. Prog.* 1990. V. 112. P. 607–619.

Gold T. The Deep Hot Biosphere // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1999. V. 89. P. 6045–6049.

Khlystov O., De Batist M., Shoji H. et al. Gas hydrate of Lake Baikal: Discovery and varieties // *Journ. of Asian Earth Sci.* 2013. V. 62. P. 162–166.

Parkes R.J., Cragg B., Roussel E. A review of prokaryotic populations and processes in sud-seafloor sediments, including biosphere interactions // *Mar. Geol.* 2014. V. 352. P. 409–425.

Verne J. A Journey to the Centre of the Earth. Penguin Books LTD. 1994. P. 256

Whitman W.B., Coleman D.C., Wiebe W.J. Prokaryotes: the unseen majority // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 1998. V. 95. P. 6578–6583

Работа поддержана междисциплинарным интеграционным проектом СО РАН (№ 82) и грантом РФФИ (№ 16–04–00181)

Авторы благодарят академика М.А. Грачева за помощь в организации исследований глубинной биоты оз. Байкал



О. В. ШУБЕНКОВА, А. С. ЗАХАРЕНКО

На планете человек сосуществует с огромным, невидимым глазу миром микроорганизмов – царством бактерий. В этом царстве все как у людей: бактерии дружат «по интересам», а некоторые предпочитают жить по принципу «ты мне – я тебе». Специальностей у бактерий много, и все они профессионалы в своей области. Например, метанотрофы «едят» метан и могут жить в самых разных, в том числе экстремальных, условиях среды. Метаноокисляющие организмы были обнаружены и в микробных сообществах «грязевых вулканов» в тектонически активных зонах Байкала рядом с глубинными выходами метана

Есть такая профессия — МЕТАН ОКИСЛЯТЬ

Метан – это предельно восстановленное органическое соединение, недоступное для живых организмов. Исключение составляют метаноокисляющие бактерии (*метанотрофы*) – уникальные биологические системы, которые используют метан в качестве единственного источника энергии и углерода. Окисляя этот простейший углеводород, они производят углекислый газ – «пищу» для фотосинтезирующих растений.

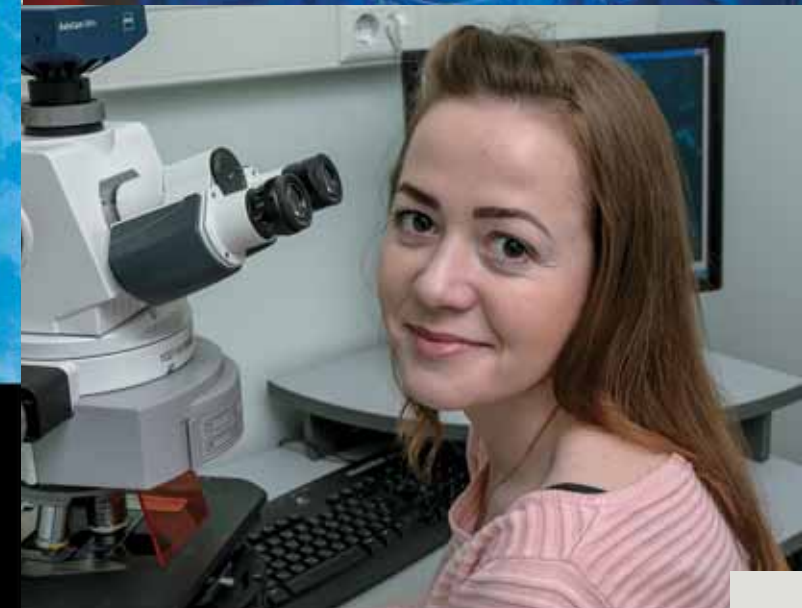
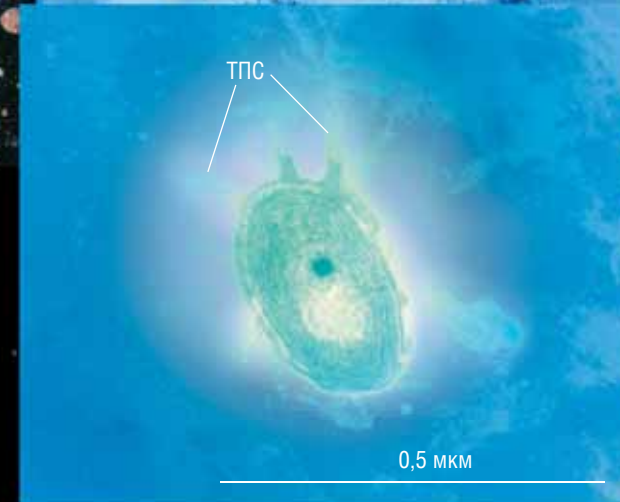
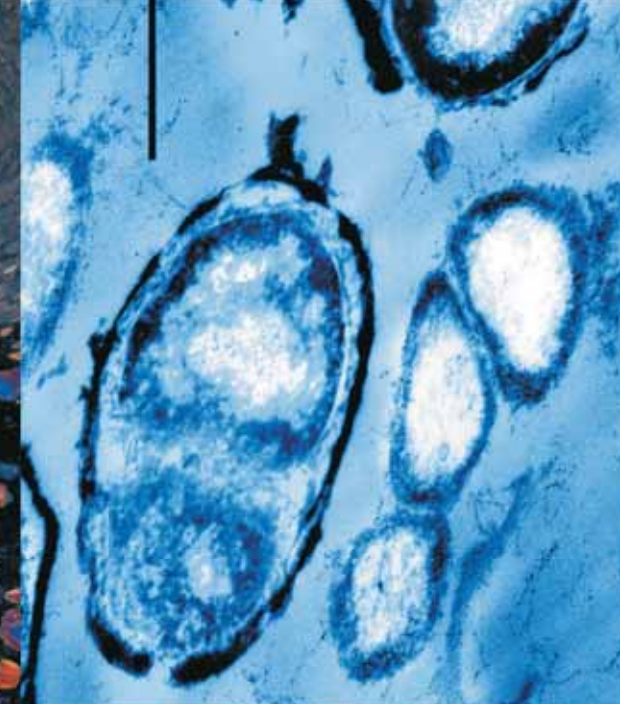
Метанотрофы обнаруживаются в самых разных экосистемах, поскольку основными факторами, определяющими их жизнедеятельность, служит наличие метана и кислорода. Источников же метана в биосфере много. Основными естественными «поставщиками» метана являются северные увлажненные экосистемы – болота и тундра с заболоченными почвами, а также осадочные отложения морей, озер, прудов и т. п. Много метана выделяют рисовые поля, термитники и, как ни удивительно, крупный рогатый скот. Среди антропогенных источников метана – свалки и разрабатываемые месторождения каменного угля и природного газа.

Важная роль метана в биосфере Земли определяется его способностью поглощать инфракрасное излучение, отраженное от поверхности планеты. И хотя его концентрация в атмосфере невелика, он занимает второе место после углекислого газа в списке так называемых «парниковых газов», влияющих на состояние климата. В этом смысле метанотрофы

Эти бактерии-метанотрофы были обнаружены в образцах придонной воды, собранных вблизи подводного грязевого вулкана «Маленький» в районе Южного Байкала, где было открыто первое приповерхностное залежание газовых гидратов – метановых «консервов».

Эпифлуоресцентная (краситель DAPI) и световая микроскопия

Радужные пятна на воде – следы присутствия байкальской нефти.
Фото О. Павловой



ШУБЕНКОВА Ольга Владимировна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории микробиологии углеводов Лимнологического института СО РАН (Иркутск).
Автор и соавтор 46 научных работ

ЗАХАРЕНКО Александра Сергеевна – главный специалист лаборатории микробиологии углеводов Лимнологического института СО РАН (Иркутск).
Автор и соавтор 8 научных работ

© О. В. Шубенкова, А. С. Захаренко

являются своего рода биологическим фильтром, препятствующим избыточной эмиссии метана в атмосферу.

В вечной мерзлоте и желудке коровы

Многоступенчатый процесс окисления метана у метанотрофов осуществляется благодаря особой ферментной системе. Первичную «атаку» молекулы субстрата осуществляет сложный ферментный комплекс – *метанмонооксигеназа*. Образующиеся затем промежуточные продукты реакции (метанол, формальдегид и формиат) последовательно окисляются специфическими ферментами.

Ассимиляция формальдегида у разных метаноокисляющих бактерий происходит в разных биохимических циклах. У метанотрофов I типа этот процесс идет по рибулозимонофосфатному пути (РМФ), II типа – по сериновому, а ряд метанотрофов объединен в так называемую группу X, потому что помимо РМФ-пути они используют еще и цикл Кальвина.

Различные пути метаболизма отражаются на внутреннем строении клетки. Особенностью метанотрофных бактерий является наличие обширно развитой системы внутрицитоплазматических мембран. У метанотрофов I и X типа эта система в виде «сложенных стопочек» располагается в центре клетки, а у II типа – по клеточной периферии. Тип расположения служит таксономическим признаком, и в этом смысле ультратонкий срез бактериальной клетки не просто напоминает отпечаток пальца человека, но также, как и он, может использоваться для идентификации.

Долгие годы с момента открытия метаноокисляющих бактерий в 1905 г. процесс метанотрофии считался строго *аэробным*, т.е. идущим только в присутствии свободного кислорода. Однако с 80-х гг. прошлого века ученые стали обнаруживать зоны ассимиляции метана в анаэробных районах. Потребовалось еще много лет, прежде чем было доказано, что в морских осадках этот процесс осуществляется сообществом архей и сульфатредуцирующих бактерий (Voetius *et al.*, 2000).

Для пресноводных же осадков определены несколько возможностей. Во-первых, сообществом архей и бактериаль-денитрификаторов, восстанавливающих нитраты до нитритов (Raghoebarsing *et al.*, 2006); во-вторых, бактериями-метаногенами, которые при определенных концентрациях метана «переворачивают» свой метаболизм, переключаясь на процесс его окисления (Wang *et al.*, 2014). Однако в лабораторных условиях пока не удалось получить культуры микроорганизмов, способных окислять метан в отсутствие кислорода, и ученые всего мира продолжают заниматься решением этой проблемы.

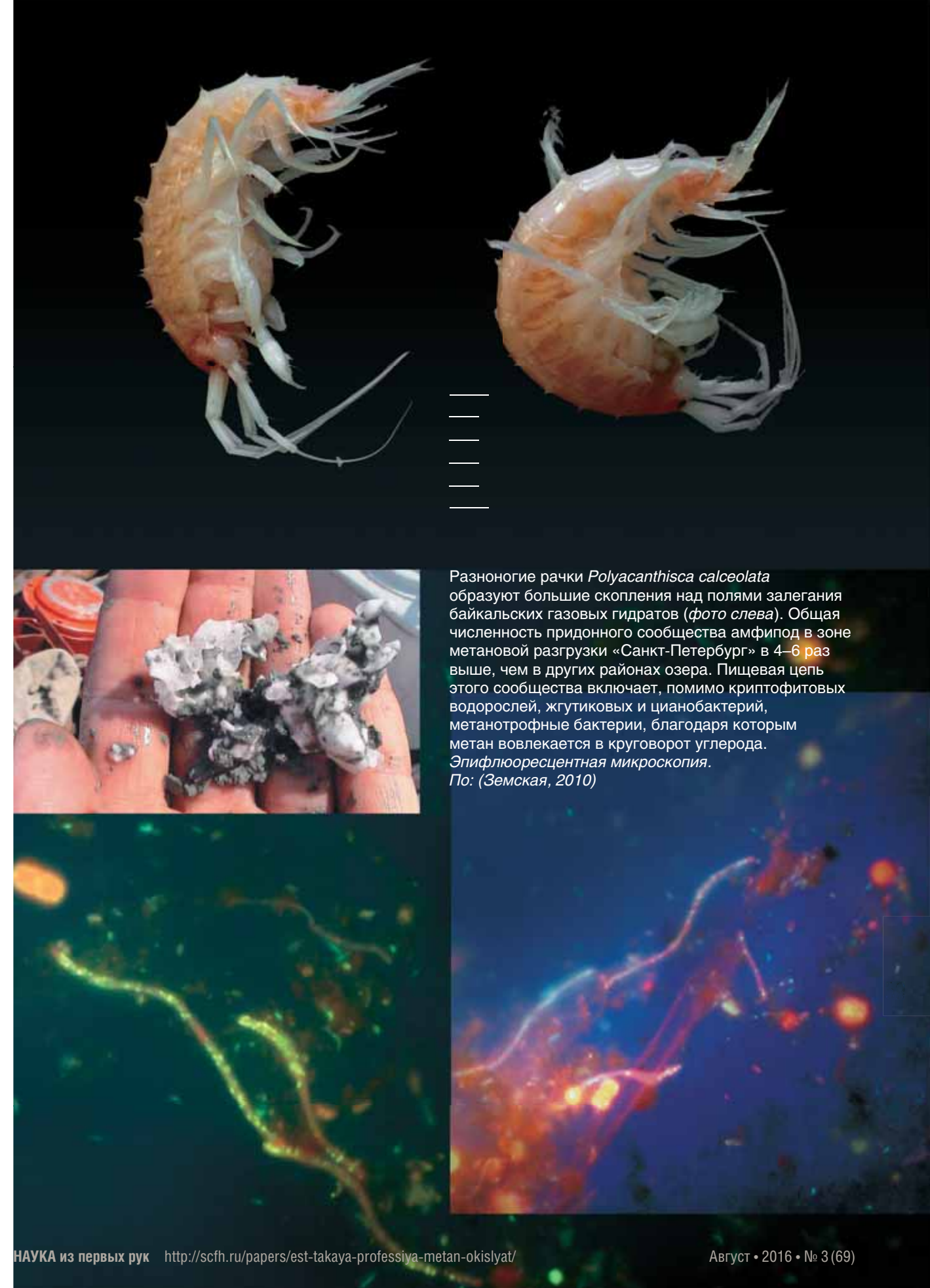
Метанотрофы, способные к активной жизнедеятельности при отрицательных температурах, представляют интерес и как модельные объекты для астробиологии, поскольку метан, метанол и формальдегид являются компонентами не только земной криолитосферы. Есть мнение, что такие метаноокисляющие микроорганизмы занимают определенное место в гипотетической криптобиосфере Марса (Троценко, Хмеленина, 2008)

Большинство известных на сегодня метанотрофов обитают в «комфортном» диапазоне температур (20–35 °С). Однако в последнее время появились доказательства существования метанотрофов в активной форме и в экстремальных условиях. Например, разнообразные метаноокисляющие организмы были обнаружены в многолетнемерзлых породах Колымской низменности. Предполагается, что даже после длительного (тысячи, миллионы лет) пребывания в вечной мерзлоте метанотрофы остаются способными к активной жизнедеятельности и могут окислять и ассимилировать метан, в том числе при отрицательной температуре (Троценко, Хмеленина, 2008). Среди метанотрофов встречаются и термофильные представители, обитающие при температуре выше 40 °С. Эти микроорганизмы также выделены из очень щелочных (pH > 9,0) и очень кислых (pH < 5,0) сред. Все эти данные позволяют говорить об огромном диапазоне адаптационных возможностей метанотрофов.

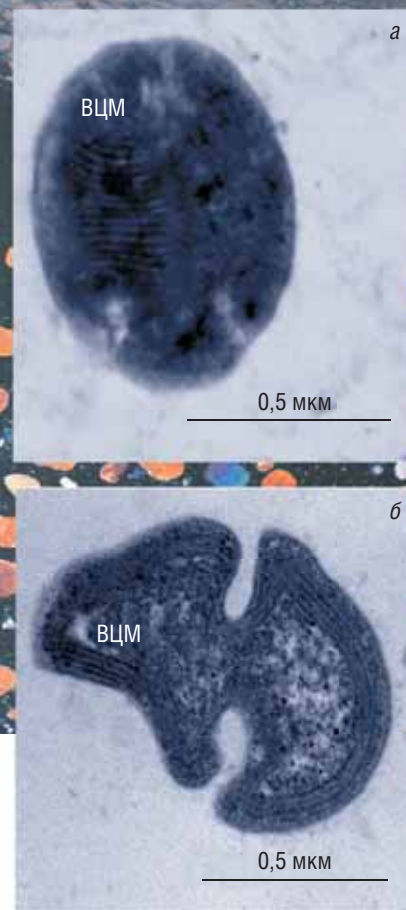
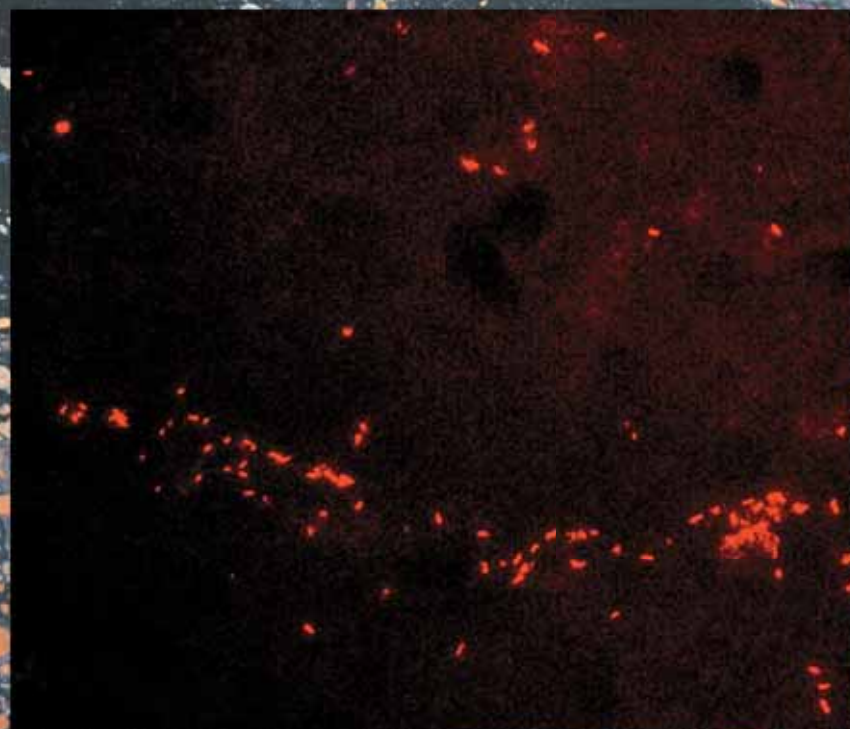
Метанотрофы на Байкале

Озеро Байкал – глубочайшее (максимальная глубина 1637 м) пресноводное озеро в мире – расположено в центре тектонически активной рифтовой зоны. В Среднем и Южном Байкале в конце прошлого века были обнаружены залежи газогидратов, содержащие метан, «законсервированный» в кристаллической решетке из молекул воды (Кузьмин и др., 1998). По сути, все озеро Байкал является резервуаром, в донных осадках которого содержится огромное количество этого газа.

Первые исследования метанотрофии на Байкале были проведены в начале 1990-х гг. Б.Б. Намсараевым (Институт общей экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ) и Т.И. Земской (Лимнологический институт СО РАН, Иркутск). С помощью иммунофлуоресцентного и радиоизотопного метода были получены данные о скорости окисления метана, численности и биоразнообразии метанотрофов в районе выхода гидротемального источника в бухте Фролиха на Северном Байкале (Намсараев, Земская, 2000). В последние годы исследователи заговорили о проблеме

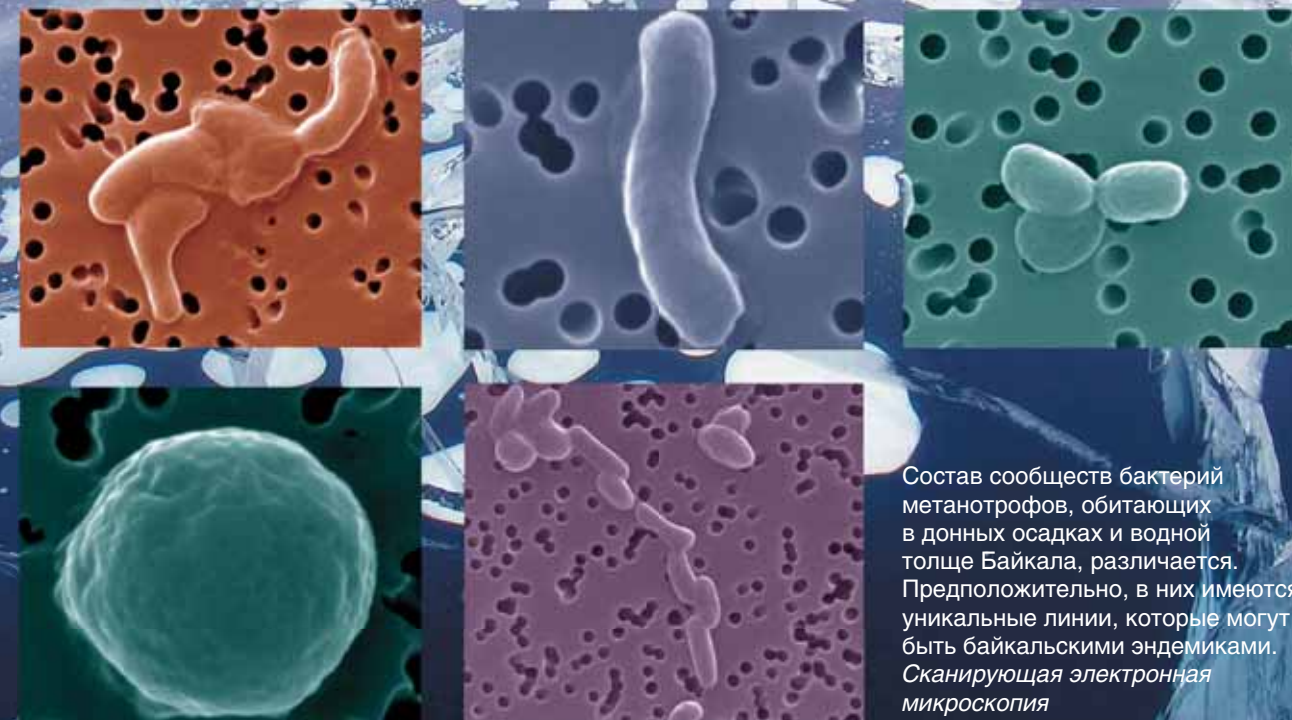


Разноногие рачки *Polyacanthisca calceolata* образуют большие скопления над полями залегающих байкальских газовых гидратов (фото слева). Общая численность придонного сообщества амфипод в зоне метановой разгрузки «Санкт-Петербург» в 4–6 раз выше, чем в других районах озера. Пищевая цепь этого сообщества включает, помимо криптофитовых водорослей, жгутиковых и цианобактерий, метанотрофные бактерии, благодаря которым метан вовлекается в круговорот углерода. Эпифлуоресцентная микроскопия. По: (Земская, 2010)



На ультратонком срезе клеток байкальских метанотрофов I (а) и II (б) типа отчетливо видны «стопочки» внутрицитоплазматических мембран, расположение которых служит таксономическим признаком.
Трансмиссионная электронная микроскопия.
Вверху слева – байкальские бактерии-метанотрофы из образца придонной воды. Эпифлуоресцентная микроскопия

Работа выполнена в рамках проекта ФАНО № 0345-2014-0009



Состав сообществ бактерий метанотрофов, обитающих в донных осадках и водной толще Байкала, различается. Предположительно, в них имеются уникальные линии, которые могут быть байкальскими эндемиками. Сканирующая электронная микроскопия

увеличения содержания метана в байкальской воде и возможных причинах этого явления (Гранин и др., 2014), и в этом смысле всестороннее изучение биоразнообразия и потенциала микроорганизмов, участвующих в цикле метана, становится актуальной задачей.

Сегодня в лаборатории микробиологии углеводов ЛИН СО РАН метанотрофия в районах грязевых вулканов, горячих и холодных выходов углеводов исследуется с помощью комплекса классических микробиологических, а также современных физико-химических и молекулярных методов. В том числе при погружениях на глубоководных обитаемых аппаратах «МИР» в месте выхода газовых гидратов на глубине 1400 м были обнаружены желеобразные микробные маты, состоящие из метанотрофных бактерий, архей и цианобактерий (Zemskaya *et al.*, 2015).

Так как вся водная толща озера и верхние 5–10 см донных осадков насыщены кислородом, метанотрофные бактерии обнаруживаются на всех глубинах. Оценить их численность в природном образце позволяет метод флуоресцентной *in situ* гибридизации (FISH), при котором используются специфические олигонуклеотидные зонды. Наибольшие величины численности и скорости окисления метана были отмечены в придонных зонах грязевых вулканов и в верхних слоях водной толщи (Захаренко и др., 2015; Pimenov *et al.*, 2014).

Благодаря использованию метода массового параллельного секвенирования, дающего возможность одновременно анализировать несколько сот тысяч нуклеотидных последовательностей, было обнаружено, что видовой состав метанотрофного сообщества донных осадков и водной толщи различается. Этим методом удалось выявить не только доминирующие микроорганизмы, но и уникальные линии метанотрофов, не имеющие культивируемых гомологов, которые могут быть байкальскими эндемиками.

В метанотрофных микроорганизмах сегодня исследователей привлекает не только их значимость в качестве метанассимилирующей системы, но и богатый «внутренний мир». Речь идет о способности синтезировать полезные продукты, довольствуясь минимальными питательными ресурсами, а также разлагать широкий спектр высокотоксичных соединений. Эти их свойства обуславливают перспективность аэробных метанотрофов для биотехнологий, в том числе технологий биологической очистки.

Бактериальную биомассу, полученную «на метане», по аминокислотному составу и содержанию витаминов можно приравнять к рыбной и соевой муке и сухому молоку. А биопротектор эктоин, который накапливается в клетках этих бактерий, даже рассматривают как потенциальное средство терапии диабета и болезни Альцгеймера (Троценко, Хмеленина, 2008).

В этом смысле эра изучения байкальских метанотрофов только начинается. Несмотря на то что наши знания постоянно пополняются, а спектр методов, с помощью которых мы сегодня можем исследовать эту очень важную для нашей планеты группу микроорганизмов, расширяется, мы сегодня прикоснулись лишь к самой вершине айсберга, основная часть которого в прямом смысле слова пока еще скрыта в глубоких водах Байкала.

Литература

- Гранин Н. Г., Верещагина О. Ф., Козлов В. В. и др. Изменение концентрации метана в озере Байкал: возможная причина // Рос. конф. «Газовые гидраты в экосистеме Земли 2014», 7–10 апреля 2014 г. Новосибирск: ИИХ СО РАН, 2014. С. 25.
- Захаренко А. С., Пименов Н. В., Иванов В. Г. и др. Окисление метана в водные толще районы газо- и нефтепроявлений Среднего и Южного Байкала // Микробиология. 2015. Т. 84. С. 98–106.
- Кузьмин М. И., Калмычков Г. В., Гелетий В. А. и др. Первая находка ГГ в осадочные толще озера Байкал // Докл. РАН. 1998. Т. 362, № 4. С. 541–543.
- Намсараев Б. Б., Земская Т. И. Микробиологические процессы круговорота углерода в донных осадках озера Байкал // Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. 160 с.
- Троценко Ю. А., Хмеленина В. Н. Экстремофильные метанотрофы. Пуццо: ОНТИ ПНЦ РАН, 2008. 206 с.
- Boetius A., Ravenschlag K., Schubert C. J. *et al.* // Nature. 2000. V. 407. P. 623–626.
- Raghoebarsing A. A., Arjan P. *et al.* A microbial consortium couples anaerobic methane oxidation to denitrification // Nature. 2006. V. 440. P. 918–921.
- Zemskaya T. I., Lomakina A. V., Shubenkova O. V. *et al.* Jelly-like microbial mats over subsurface fields of gas hydrates at the st. Peterburg methane seep (Central Baikal) // Geomicrobiology J. 2015. V. 32. P. 89–100.
- Wang F. P., Zhang Y., Chen Y. *et al.* Methanotrophic archaea possessing diverging methane-oxidizing and electron-transporting pathways // ISME J. 2014. V. 8. P. 1069–1078.

А.В. НАТЯГАНОВА

«...Какова же генетическая значимость кариотипа? Думаю, самым правильным будет ответ: его сцепленность, из которого вытекает новый вопрос: почему так важно иметь в нужных местах нужные гены?»
Г. Макгрегор, 1986

О хромосомных «судьбах» обитателей Байкала

«Инструкция» по созданию и функционированию любого живого организма, как известно, «записана» в его генах. Однако эта наследственная информация расположена в клетке не хаотично. У высших эукариотических организмов, к которым относится и человек, основная часть материального носителя этой информации – ДНК, расположена в клеточном ядре и организована в специальные структуры – хромосомы. Такой хромосомный уровень организации наследственного материала служит необходимым условием сцепления генов и перераспределения родительских генов у потомков при половом размножении. Изменение же специфического набора хромосом вследствие хромосомных и геномных мутаций может привести к образованию новых видов или появлению новых адаптаций к условиям окружающей среды

При слове «хромосомы» многим представляются таинственные «иксы» и «игреки» в клетках нашего организма, обеспечивающие передачу особенностей внешности и характеров от родителей к детям. В принципе это не так уж далеко от истины. Точнее, хромосомы представляют собой микроструктуры в форме нитей из линейных, компактно «упакованных» молекул ДНК – основного носителя наследственной информации. Вещество хромосом, включающее также белки, называют *хроматином*.

Диплоидные наборы хромосом ($2n$) из двух морфологически сходных (гомологичных) родительских комплектов формируют главную часть каждой соматической клетки животных и растений – клеточное ядро. У человека, например, $2n = 46$; у собаки – $2n = 78$; у кошки – $2n = 38$. В половых клетках – сперматозоидах и яйцеклетках, содержатся, соответственно, гаплоидные (одинарные) наборы хромосом (n).

У представителей каждого вида животного или растения в клеточных ядрах имеется один и тот же специфический набор хромосом – *кариотип* (от лат. *kario* – ядро), который может служить «цитогенетическим паспортом» вида. Получают такой паспорт на основе *кариотипирования* – подробного анализа всех характеристик хромосом (количества, морфологии и др.), включая их полное описание, зарисовку или фотографирование.

Разнообразие кариотипов сопоставимо с разнообразием растений или животных, так как образование новых видов очень часто сопровождается различными хромосомными перестройками. Поэтому кариотип считают одним из важных признаков, используемых для выяснения родственных связей между разными таксономическими группами, выявления механизмов видообразования, а также при решении экологических задач. Все это имеет особую актуальность для изучения обитателей Байкала, подавляющее большинство которых являются *эндемиками*, т. е. сформировались и эволюционировали именно в этом озере.

На сегодня мы располагаем сведениями о кариотипах лишь 145 видов байкальских гидробионтов, т. е. 5,6% от их общего числа. Тем не менее некоторые из этих таксономических групп дают нам интересные и поучительные образцы различных хромосомных «судеб».

Разноногие и равноногие – хромосомное противостояние

Обитающие в Байкале пресноводные раки отряда Amphipoda (разноногие раки, бокоплавы) выделяются своим видовым разнообразием даже среди богатой байкальской фауны. Они представлены огромным

НАТЯГАНОВА Антонина Валентиновна – научный сотрудник лаборатории геносистематики Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 68 научных работ и 1 патента

Ключевые слова: озеро Байкал, эндемики, хромосомы, кариотип, диплоидное число, экологический мониторинг.

Key words: Lake Baikal, endemics, chromosomes, karyotype, diploid number, ecological monitoring

© А.В. Натяганова, 2016



Ommatogammarus albinus
(Dyb., 1874)

Dorogostaiskia parasitica
(Dyb., 1874)



Ommatogammarus albinus
(Dyb., 1874)

Pallaseopsis cancelloides
(Gerstf., 1858)

Все эти виды байкальских разноногих раков Amphipoda, принадлежащие к разным семействам, имеют одно и то же число хромосом ($2n = 52$)

«букетом» из 347 видов, подавляющее большинство которых – эндемики (Тахтеев, 2000, Камалтынов, 2001).

Байкальские бокоплавцы демонстрируют исключительное разнообразие своей внешней морфологии, поведения и жизненных стратегий. Вместе с тем при исследовании хромосомных наборов у 33 видов и двух подвигов, принадлежащих к 18 родам (39% от общего числа родов), было обнаружено удивительное единообразие кариотипов. Все они, за единственным исключением, имеют диплоидные наборы из 52 хромосом сходной морфологии (Salemaa, Kamaltynov, 1994).

Число хромосом у амфипод обычно варьирует в довольно широком диапазоне ($2n = 10, \dots, 126$), при этом наибольшую изменчивость демонстрируют морские виды (Libertini, Krapp-Schickel, 2000; Natiyaganova, Sitnikova, 2012). Изучение фауны бокоплавцов из пресноводного Охридского озера на Балканах, по возрасту и происхождению схожего с Байкалом, также выявило довольно большое разнообразие в диплоидных наборах: $2n = 24, 42, 50, 52, 68$ (Salemaa, Kamaltynov, 1994). Авторы этого исследования расценили поразительное

Между делениями в соматических клетках происходит удвоение наборов хромосом. В ходе клеточных делений (митозов) они распределяются в дочерние клетки. Удвоенные и сконденсированные хромосомы, еще не разошедшиеся к разным полюсам клетки и сохраняющие контакт друг с другом, имеют вид букв «X» или «V». Эти митотические хромосомы хорошо видны под обычным светооптическим микроскопом, поэтому с давних пор они используются как удобный объект в различных генетических исследованиях

единообразие хромосомных наборов байкальских видов как эволюционный парадокс. Для объяснения этой загадки они выдвинули предположение, что кариотипическая дифференциация сопровождается возникновением видов на ранних этапах становления фауны, поэтому стабильность хромосомных наборов у байкальских



У байкальских равноногих раков (Isopoda), в отличие от разноногих, число хромосом существенно колеблется ($2n = 8, 12, 16, 24$).

амфипод свидетельствует в пользу их более древнего пресноводного происхождения.

Наше кариотипирование байкальских амфипод показало, что хотя их хромосомные наборы на первый взгляд выглядят сходными, они различаются по морфологической структуре. Очевидно, эти различия обусловлены хромосомными перестройками небольшого масштаба, не меняющими диплоидное число, а именно: *инверсиями* (переворотами на 180°) и *делециями* (потерями) небольших хромосомных участков (Натяганова и др., 2003).

Противоположная ситуация наблюдается у другой группы высших ракообразных Байкала – отряда Isopoda (равноногие раки). В озере обитает всего шесть эндемичных видов, принадлежащих двум родам одного семейства Asellidae (осликовые), тогда как в мире этих ракообразных насчитывается более 4 тыс. видов, из которых около 360 – азеллиды.

Многие семейства равноногих ракообразных характеризуются изменчивостью хромосомных чисел (Niijama, 1959; Hedgcock *et al.*, 1982). У азеллид, в частности, такие

различия наблюдаются либо между родами, либо между видами одного рода, но из достаточно разобщенных местообитаний. В том же Охридском озере, к примеру, обитает четыре вида водяных осликов из одного рода с одинаковым диплоидным набором $2n = 22$ (Salemaa, 1985). Однако все виды байкальских водяных осликов существенно различаются между собой как по числу ($2n = 8, 12, 16, 24$), так и по морфологии хромосом (Натяганова, 2001). Кроме того, диплоидное значение восемь на сегодня является уникально маленьким для равноногих раков всего мира.

Молекулярно-генетический анализ выявил две причины такого разнообразия хромосомных комплексов у байкальских равноногих (Hidding *et al.*, 2000). Первая – это происхождение от разных предков в результате двух независимых «вторжений» из водоемов Восточной Азии и Северной Америки. Североамериканские предки азеллид проникли в Сибирь в районе Берингийского пролива, где 5–7 млн лет назад была суша. От одного из этих «интервентов» и произошел род *Baicalasellus* Stammer, 1932, четыре вида которого сформировались



Среди обитателей Байкала самое маленькое хромосомное число $2n = 4$ имеет свободноживущий ресничный червь *Gyratrix hermaphroditus* (Ehrenberg, 1831), встречающийся на дне пресноводных водоемов и морей. Фото О. Тимошкина (ЛИН СО РАН, Иркутск)

уже в самом Байкале благодаря хромосомным преобразованиям – второй причине кариотипического разнообразия байкальских изопод. Хромосомные числа представителей трех видов рода *Baicalasellus* образуют ряд кратных чисел – 8, 16, 24, что свидетельствует в пользу полиплоидного видообразования, связанного с увеличением числа хромосом на один и больше гаплоидных наборов.

Интересно, что молекулярно-генетические данные не подтвердили ожидаемое близкое родство между байкальским осликом *Baicalasellus angarensis* Dybowski, 1884 и широко распространенным в Европе рачком *Asellus aquaticus* L (Racovitza, 1919), которые имеют одно и то же диплоидное значение и сходную морфологию хромосом (Natyaganova *et al.*, 1996). Этот факт свидетельствует, что эволюционные изменения кариотипов могут идти параллельно даже у достаточно далеких в родственном отношении видов.

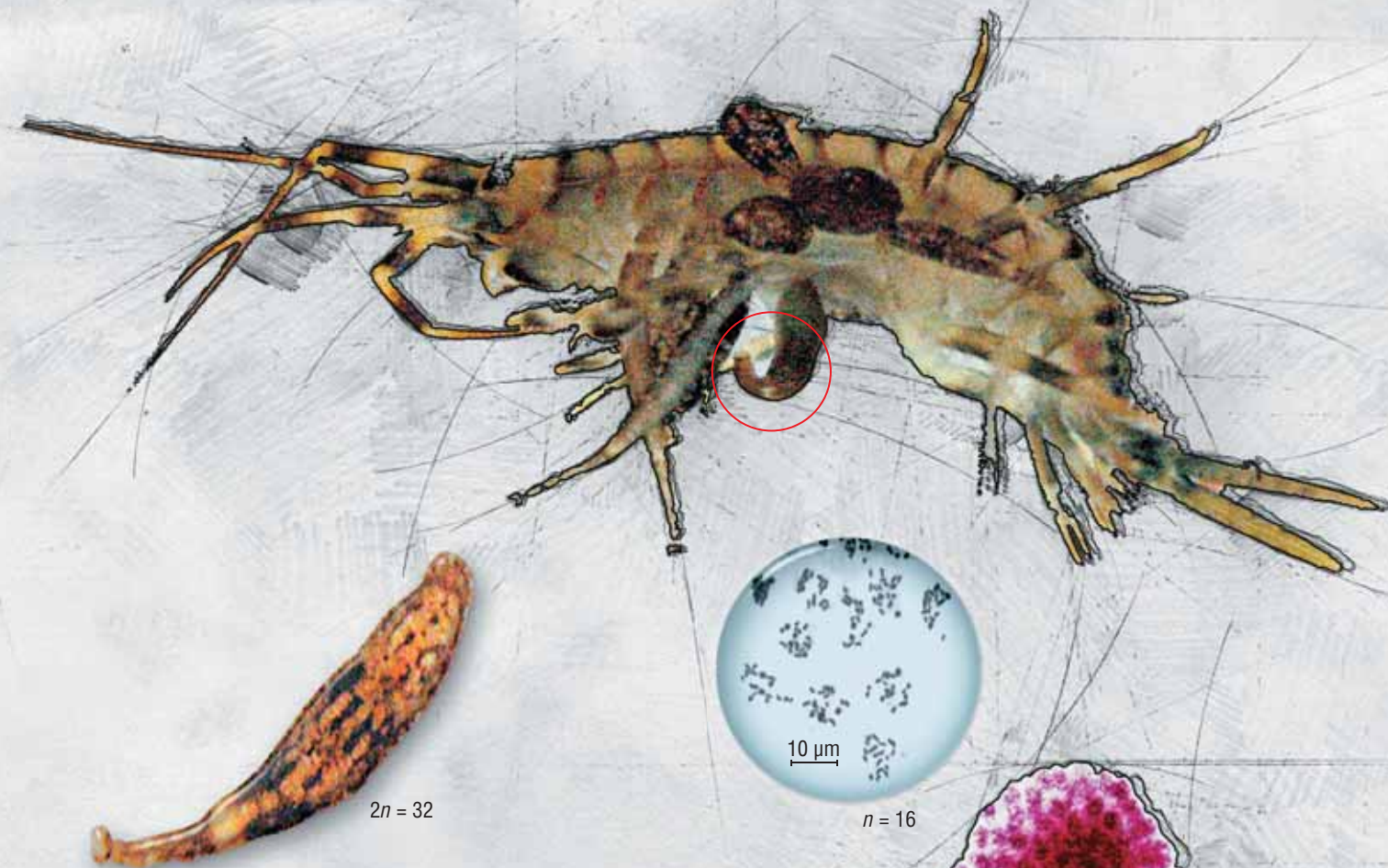
Кариотип – разделяющий и объединяющий

Межвидовая кариотипическая дифференциация внутри родов характерна и для некоторых групп эндемичных байкальских червей. Так, у плоских ресничных червей из рода *Geocentrophora* de Man, 1876 были обнаружены четыре варианта хромосомных чисел, а из рода *Bdellocephala* de Man, 1875 – три варианта кариотипа, различающихся по хромосомному числу, и шесть – по морфологии хромосом (Новикова, Тимошкин, 1995). Видообразование у этих гидробионтов сопровождали инверсии, а также *транслокации* (переносы участков между хромосомами).

Путем разделения жизненной ниши и хромосомных преобразований возникли два вида кольчатых червей из рода *Baicalobdella*. Пиявки вида *B. torquta* (Grube, 1871), паразитирующие на одном из видов амфипод, имеют хромосомный набор $2n = 32$, а *B. cottidarum* Dogiel, 1957, питающиеся кровью байкальских бычков-подкаменщиков, – $2n = 34$ (Kaugorodova, Natyaganova, 2015).

Наименьшее среди обитателей Байкала хромосомное число ($2n = 4$) демонстрируют плоские черви, относящиеся к видовому комплексу *Gyratrix hermaphroditus* Ehrenberg, 1831. Кстати, эти черви вовсе не эндемики, а космополиты. Примечательно, что особи, добытые из разных географических мест, имеют одинаковый внешний вид, но отличаются морфологией своих хромосом и половых органов. Проведенный нами статистический анализ этих данных, включая полученные на Байкале, выявил прямую зависимость между размерами этих структур (Натяганова и др., 2015). Пример этих маленьких жителей дна показывает, что структурные перестройки, изменяющие форму хромосом, могут вызывать и заметные трансформации целых органов.

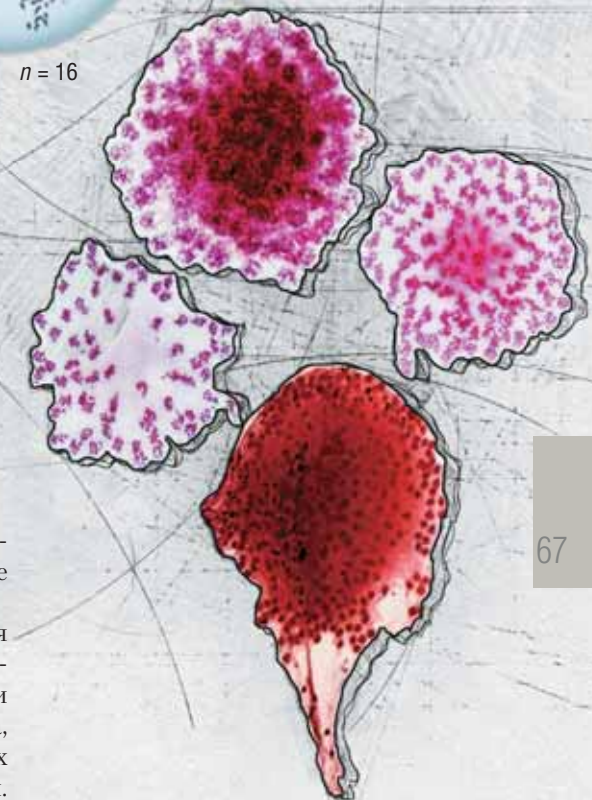
В поле зрения цитогенетиков попала и такая богатая видами группа беспозвоночных гидробионтов Байкала, как брюхоногие моллюски или улитки (Gastropoda), которых здесь насчитывают около 150 видов (Ситникова и др., 2001). Кариотипические исследования 18 видов улиток показали, что в пределах одного рода они имеют одно и то же число хромосом, однако между родами этот признак варьирует (Побережный, 1989). Поэтому в данном случае хромосомное число может служить четким классифицирующим признаком. Можно предположить, что у этих животных хромосомные

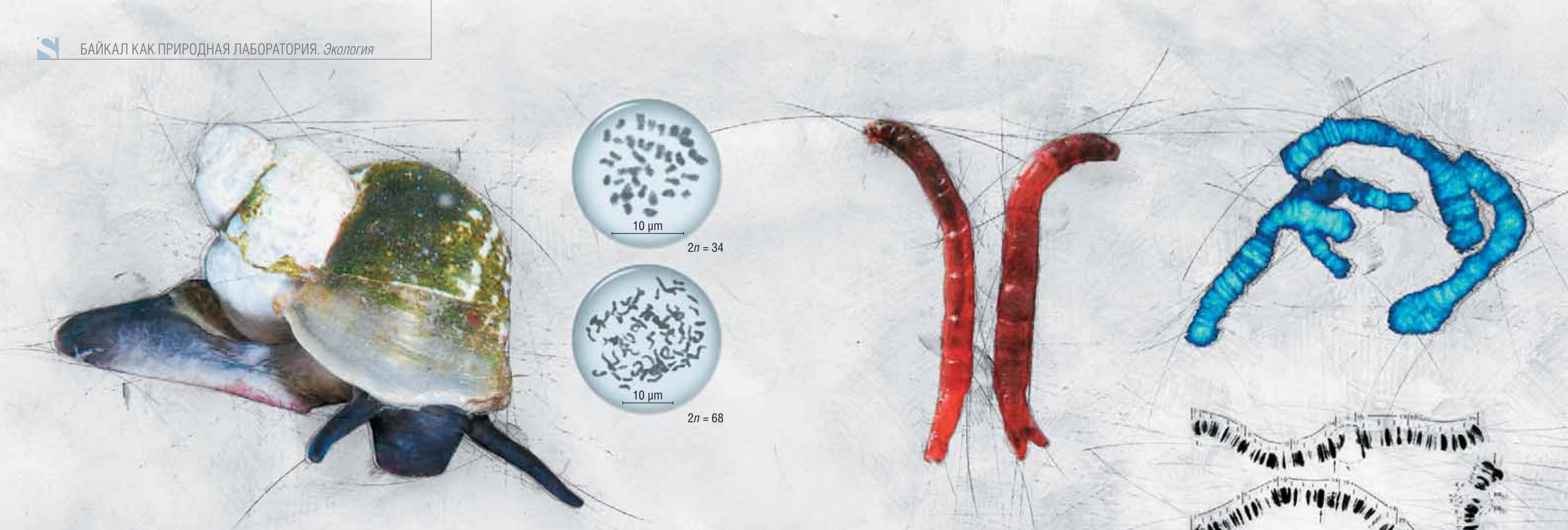


Байкальские эндемичные пиявки вида *Baicalobdella torquta* (Grube, 1871), паразитирующие на разноногих раках, имеют диплоидное хромосомное число $2n = 32$. На цитологических препаратах, приготовленных из их семенников, можно увидеть удивительные картины «салюта» из синхронно делящихся клеточных ядер (справа). Отдельная «гроздь огней» представляет собой совокупность ядер, находящихся на одной стадии сперматогенеза. Одна из таких стадий особенно удобна для подсчета гаплоидного числа хромосом (n), так как в этом случае клеточные ядра представлены набором отчетливо видимых структур – так называемых «хромосомных бивалентов», состоящих из двух гомологичных пар хромосом

перестройки настолько действенны, что приводили к появлению значительно генетически и морфологически различающихся особей, которые становились прародителями новых родовых группировок.

В связи с этим интересна спонтанная полиплоидия, обнаруженная в популяциях улиток рода *Benedictia* W. Dybowski, 1875, где некоторые особи имеют в своих клетках хромосомные наборы с $2n = 3n$ или $2n = 4n$ (т.е. не 34 хромосомы, как у большинства представителей вида, а 51 или 68). Причиной этого редкого для раздельнополых животных явления может быть *партеногенез* – размножение без оплодотворения. Партеногенезу, в свою очередь, способствует соотношение полов, сдвинутое в сторону женских особей: в различных популяциях этих моллюсков на одного самца приходится 3–60 самок (Побережный, 1989).





Байкальский эндемичный моллюск *Benedictia baicalensis* (Gerstfeldt, 1959) может иметь как нормальный диплоидный ($2n = 34$), так и полиплоидный ($2n = 68$) набор хромосом.
 Фото О. Каменской (ЛИН СО РАН, Иркутск)

Кариотипические исследования двух эндемичных байкальских брюхоногих моллюсков – *Benedictia baicalensis* (Gerstfeldt, 1959) и *Megalovalvata piligera* Lindholm, 1909, сослужили хорошую службу экологическому мониторингу, направленному на оценку степени антропогенного воздействия. Оказалось, что у улиток, обитающих в районе сброса промышленных стоков Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, существенно повышается частота хромосомных повреждений (Побережный, 1989)

Картируем хромосомы

Интересными кариотипическими объектами среди байкальских гидробионтов являются также личинки хирономид, некусающих комаров-звонцов из отряда Diptera (двукрылые). Эти червеобразные организмы длиной до 3 см известны не только как излюбленный корм для рыб (мотыль), но и своими гигантскими многонитчатыми (*политенными*) хромосомами. Такие хромосомы образуются в ходе многократного копирования (репликации) ДНК при отсутствии клеточных делений. При этом гомологичные родительские хромосомы, превратившиеся в многотысячные пучки хроматиновых нитей, плотно соединяются (конъюгируют).

В результате в клетках формируются гигантские ядра с политенными структурами, количество которых равно гаплоидному числу (n) организма. Из-за неравномерной плотности хроматиновых нитей сформированные из них хромосомные фигуры при окрашивании выглядят как толстые полосатые жгуты, каждый из которых имеет уникальный рисунок поперечной исчерченности, отражающий специфичную дисковую структуру хромосомы. Поэтому политенные хромосомы – очень информативный объект для цитогенетических исследований.

У хирономид наиболее подробно изучены политенные хромосомы из клеточных ядер слюнных желез. Тысячи копий генетической информации, хранящиеся в этих клетках, востребованы для синтеза большого объема секрета, с помощью которого личинки скрепляют мелкие частицы грунта, создавая своеобразные домики или ловчие сети. Диплоидные значения у хирономид

чаще невысокие (6 или 8), поэтому в клеточных ядрах слюнных желез находятся, соответственно, 3 или 4 гигантские политенные хромосомы. Специалисты получают их фотоизображения и детально картируют дисковую структуру хромосом, которая служит надежным идентифицирующим и дифференцирующим признаком.

Личинки хирономид – типичный компонент донных сообществ. Среди обнаруженных в Байкале 139 видов из 62 родов, 16 видов – эндемики. Большую роль в понимании эволюции этой группы насекомых в озере сыграли данные картирования политенных хромосом эндемичных видов рода *Sergentia* Kieffer, 1922. К этому роду относятся 15 видов, имеющих одинаковый набор хромосом, личинки которых при этом морфологически отличаются друг от друга (Провиз, Провиз, 1999, 2001).

Оказалось, что видообразование у этих насекомых в ряде случаев сопровождалось выраженными преобразованиями хромосомной структуры хромосом. Так, три узко адаптированных вида, обитающих в литоральной зоне, имеют одинаковые дисковые последовательности. Другие же виды, широко освоившие литораль или жи-

Красные «червячки» – личинки одного из видов хирономид, известные всем рыбакам под названием «мотыль», а голубые – их политенные хромосомы, окрашенные флуоресцентным красителем.
 Справа внизу – цитофотокарта хирономиды *Sergentia rara* Proviz V. et Proviz L. (Провиз, Провиз, 1999)

вущие на больших глубинах, различаются по этой характеристике в основном за счет гомозиготных инверсий – поворотов участков в обеих гомологичных хромосомах.

Эти данные свидетельствуют о том, что внутренняя организация самих хромосом представляет важную особенность кариотипа, которая может быть задействована в процессах адаптации и видообразования. И в тех случаях, когда у большого «букета» видов обнаруживается «кариотипическая инертность», как у тех же байкальских бокоплавов, стоит обратить пристальное внимание на тонкую структуру носителей генов.



Байкальская нерпа.
Фото Н. Волокитиной (ЛИН СО РАН, Иркутск)

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕРПЫ

Байкальская нерпа (*Pusa sibirica* Gmelin) – единственное эндемичное млекопитающее Байкала, получила свой цитогенетический «паспорт» уже почти полвека назад (Анбиндер, 1980). Интерес к этим работам был связан с попытками определения времени ее появления в озере и выявления родственных связей с другими видами тюленей и другими группами водных и наземных млекопитающих. Оказалось, что кариотип байкальской нерпы ($2n = 32$), как в отношении числа, так и морфологии хромосом, чрезвычайно сходен с кариотипами кольчатого (обитающего в Баренцевом, Беринговом, Чукотском и Охотском морях) и каспийского тюленей, что, по мнению Е. М. Анбиндера, подтверждает их родственные связи

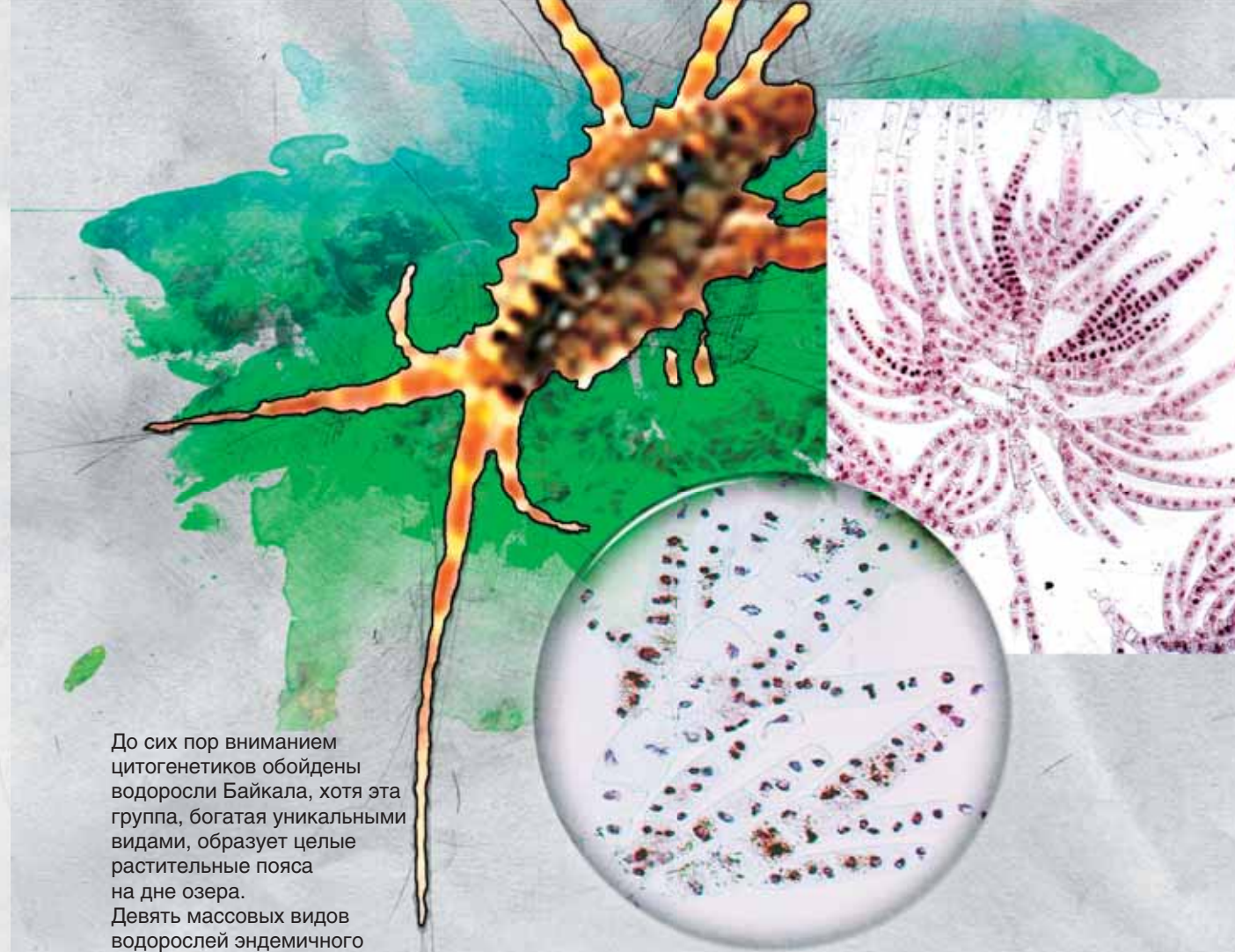
Даже эти небольшие заметки о хромосомных наборах обитателей озера Байкал ясно показывают, что в ходе эволюции кариотипы различных организмов ведут себя по-разному. Пока в одних фаунистических группах число и структура хромосом остаются сходными даже у видов с далекой степенью родства, в других значительные кариотипические преобразования идут в пределах одного и того же рода. С точки зрения систематики, в одних случаях кариотип выступает интегрирующим (у амфипод и моллюсков), а в других – дифференцирующим (у изопод и червей) признаком.

Для объяснения непостоянства поведения хромосомных наборов было высказано предположение о лабильности (способности к структурному переупорядочиванию) и консервативности («жесткости») геномов, которые зависят от наличия в них гетерохроматинового компонента – «молчащей», т. е. некодирующей, суперконденсированной ДНК, представленной повторяющимися нуклеотидными последовательностями (Стегний, 1993). Лабильный геном содержит небольшой объем гетерохроматина, преимущественно локализованного в районах первичных перетяжек хромосом. В случае

же консервативного генома большое количество этого материала диспергировано по всей длине хромосом. При этом было отмечено, что в ходе эволюции консервативность генома возрастает по мере перехода от исходных к «производным» видам. То есть речь идет о том, что у видов с более древними корнями хромосомы не склонны к сильным изменениям.

Наши результаты компьютерного моделирования кариотипической эволюции показали, что различия в видовых букетах байкальских гидробионтов (например, у амфипод и изопод) могут быть связаны с хромосомными перестройками разного масштаба (Натяганова, Букин, 2009), которые, в свою очередь, зависят от внутренней организации хромосом, степени их пластичности или, как говорилось выше, лабильности и жесткости. И в этом смысле изучение хромосомных наборов в пределах фаунистических групп отдельной экосистемы позволяет оценить относительный возраст не только этих групп, но и самой экосистемы. И хромосомы эндемичных амфипод Байкала убедительно свидетельствуют о довольно «преклонном» возрасте озера.

Работа выполнена в рамках проекта ФАНО № 0345-2014-0005 и при поддержке РФФИ (грант №15-29-02515)



До сих пор вниманием цитогенетиков обойдены водоросли Байкала, хотя эта группа, богатая уникальными видами, образует целые растительные пояса на дне озера. Девять массовых видов водорослей эндемичного рода *Draparnaldioides* Meyer et Skabitsch, 1976, доминирующих в зоне литорали в весенне-осенний период, представляют собой эволюционную «параллель» широко распространенному в пресных водах роду *Draparnaldia* Vogt. Большинство видов байкальских драпарнальдий имеют ряды морфологических форм, предположительно являющихся результатом межвидовых скрещиваний (Ижболдина, 2007). В ходе начатого нами кариотипического изучения вида *Draparnaldioides baikalensis* Meyer et Skabitsch, 1976 было установлено, что многие делящиеся ядра в вегетативных клетках водоросли имеют структуру, необычную для типичного митоза и не отмеченную в описаниях европейских видов (вверху справа). На фото – драпарнальдии на дне Байкала. Фото О. Каменской (Иркутск)

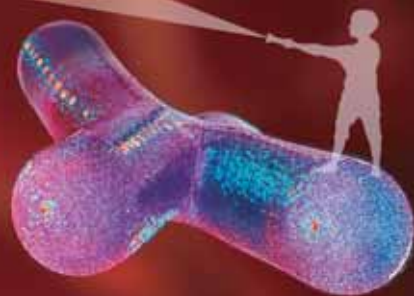
Литература

- Натяганова А. В. Равноногие раки (*Malacostraca, Isopoda*) // Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2001. Т. 1: Озеро Байкал, кн. 1. С. 558–571.
- Натяганова А. В., Букин Ю. С. Парадокс размеров таксонов. Проявление феномена в фауне озера Байкал и его возможная причина // Изв. Иркутск. гос. ун-та. Сер. «Биология. Экология» 2009. Т. 2, № 2. С. 79–82.
- Побережный Е. С. Байкальские эндемичные моллюски как объект гидро-биологического мониторинга: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск. 1989. 17 с.
- Kaygorodova I. A., Natiyaganova A. V. Karyotype characterization of the endemic piscine leech from Lake Baikal with vindication of *Baicalobdella cottidarum* Dogiel, 1957 (*Piscicolidae, Hirudinea*) // Arch. Biol. Sci. Belgrade. 2015. V. 67. (4). P. 1405–1410.
- Hidding B., Michel E., Natiyaganova A. V. et al. Molecular evidence reveals a polyphyletic origin and chromosomal speciation of Lake Baikal's endemic asselid isopods. // Molecular Ecology. 2003. V. 12. P. 1509–1514.
- Natiyaganova A. V., Kamaltynov R. M., Sherbakov D. Y. The chromosomes of the *Baicalasellus angarensis* (*Isopoda, Asellidae*). *Crustaceana*. 1996. V. 69(6). P. 696–702.
- Natiyaganova A. V., Sitnikova T. Y. Karyotype of the Baikal amphipod *Polyacanthisca calceolata* Bazikalova, 1937, (*Crustacea, Amphipoda*). *Chromosome Science*. 2012. V. 15. P. 43–48.
- Salemaa H., Kamaltynov R. The chromosome numbers of amphipod crustaceans – an evolutionary paradox in the ancient lakes // Arch. Hydrobiol. 1994, V. 44. P. 247–256.

А. Г. КОРОЛЕВА

СТРУКТУРА И ДЛИНА ТЕЛОМЕР: загадкам нет конца

Хотя теломерной биологии по современным меркам уже немало лет и по этой теме имеется большой экспериментальный материал, вопросов со временем становится больше, чем ответов. Являются ли теломеры «молекулярными часами», отсчитывающими время жизни? Почему у слона они короткие, а у мыши длинные? Почему они могут быть разными у идентичных близнецов? Связан ли размер теломер с размером организма? А от чего зависит активность фермента теломеразы, способного восстанавливать теломеры? Все же кое-какие закономерности ученым удалось выявить, несмотря на то что эта область науки постоянно преподносит новые сюрпризы



Теломерная биология – это область науки, которая изучает *теломеры* – концевые районы хромосом, неспособные к соединению с другими хромосомами и в силу этого играющие роль «защитных колпачков». Широкий же интерес к этим структурным элементам хромосом был вызван появлением теории старения, согласно которой этот процесс – следствие укорачивания теломер с возрастом из-за их неполного копирования в процессе удвоения ДНК.

**Я вся такая...
внезапная, такая
противоречивая!**

История теломерной биологии началась в 1930-е гг., когда Г. Мюллер и Б. Мак-Клинтон описали теломеры как особые структуры хромосом, не позволяющие им слипаться друг с другом. Понятно, что во времена, когда еще не знали, как закодирована наследственная информация в клетке, установить природу теломер было невозможно. Период активного изучения теломер начался в 1980-х гг. и увенчался Нобелевской премией 2009 г. (Зверева и др., 2010).

Первым организмом, у которого определили последовательность

Ключевые слова: теломеры, структура теломерного повтора, длина теломерных районов.

Key words: telomeres, structure of telomere repeat, telomere length



КОРОЛЕВА Анастасия Геннадьевна – ведущий инженер лаборатории ихтиологии Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 4 научных работ

нуклеотидов теломерной ДНК, была инфузория *тетрахимена* (Блекберн, 1978). Оказалось, что теломерная ДНК этого простейшего состоит из шести нуклеотидов TTGGGG, повторяющихся четыре-пять раз – такие структуры называют короткими повторами (*мини-* и *микросателлитами*). Затем структуру теломерных районов определили у других организмов из разных таксономических групп. Оказалось, что у большинства позвоночных это короткий повтор TTAGGG, у членистоногих (Arthropoda) – TTAGG, у круглых червей (Nematoda) – TTAGGC, у растений – TTTAGGG.

Со временем короткие повторы стали называть согласно таксономической группе, у которой они впервые были прочитаны. В результате TTAGGG стал «позвоночным» или «человеческим» типом теломер, TTAGG – «артроподным», TTAGGC – «нематодным», а TTTAGGG – «арабидопсисным» – по названию растения *Arabidopsis thaliana*. Позже выяснилось, что эти названия не соответствуют реальному положению вещей. «Позвоночный» тип теломер широко распространен среди беспозвоночных животных – кишечнорастных, плоских червей, моллюсков, встречается у некоторых простейших, членистоногих, растений и грибов, характерен для самого примитивного многоклеточного животного – *трихоплакса*. Во избежание путаницы было бы разумнее назвать этот теломерный повтор, например, базовым или первичным, но он остался «человеческим». Правда остальные типы повторов, за некоторым исключением, действительно характерны для тех организмов, в честь которых названы.

© А. Г. Королева, 2016



Первооткрывателями теломер стали известные американские генетики – Герман Мюллер, работавший с полюбившейся генетикам мушкой дрозофилой, и лауреат Нобелевской премии по физиологии и медицине – Барбара Мак-Клинток (вверху), объектом исследований которой была не менее любимая селекционерами и генными инженерами кукуруза. *Public Domain*

На путанице в названиях дело не закончилось. Достаточно обескураживающим открытием стало то, что не у всех организмов теломеры состоят из микросателлитов. Прежде считалось, что только короткие повторы ДНК консервативной структуры могут защищать концы хромосом, но у двукрылых насекомых и некоторых растений были выявлены теломерные структуры, значительно отличающиеся от типичных коротких повторов.

Так, у комаров рода *Chironomus* и *Anopheles* в роли теломер выступает *сателлитная ДНК*, представляющая собой повторы из нескольких сотен пар нуклеотидов. У дрозофилы теломеры состоят из перемещающихся по геному мобильных элементов – *ретротранспозонов* HeT-A, TART и TAHRE. Один из них, TART, был также обнаружен на концах хромосом мухи *Rhinosciara americana*. Возможно, нетипичные теломеры характерны для всех представителей многочисленного (более 150 тыс. видов) отряда двукрылых насекомых. Среди растений нетипичные теломеры найдены у некоторых видов подсемейств

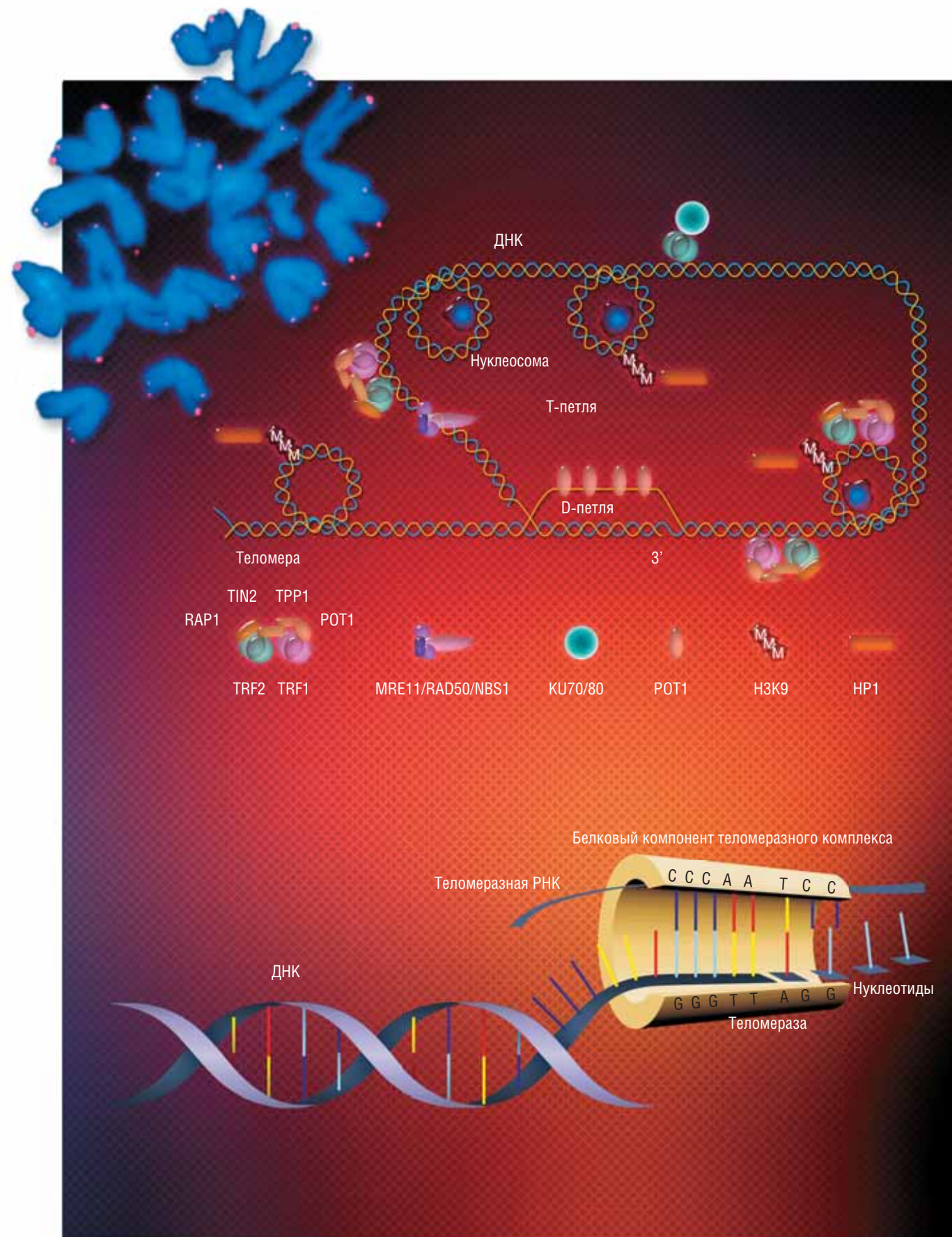
Хромосомы с окрашенными с помощью флуоресцентной гибридизации *in situ* (FISH) теломерами (слева вверху) и схема строения отдельной теломеры (справа вверху). Теломеры обычно состоят из 5–7 нуклеотидных повторов ДНК и ассоциированных с ними особых белков (их комплекс называют шелтерином, от англ. *shelter* – прикрытие). Также как и остальная часть ДНК, теломерная ДНК организована в нуклеосомы, представляющие собой сердцевину из модифицированных белков-гистонов, на которую намотана ДНК. Теломерная ДНК образует две петли: большую из двухцепочечной ДНК (Т-петля) и маленькую из одноцепочечной ДНК (D-петля). Последняя петля появляется из-за того, что конец теломерной ДНК, состоящий из одной цепи (оверхенг, выступ), при образовании петли замещает одну из цепей двухцепочечной ДНК. По: (Bombarova et al., 2009 и Zellinger et al., 2007)

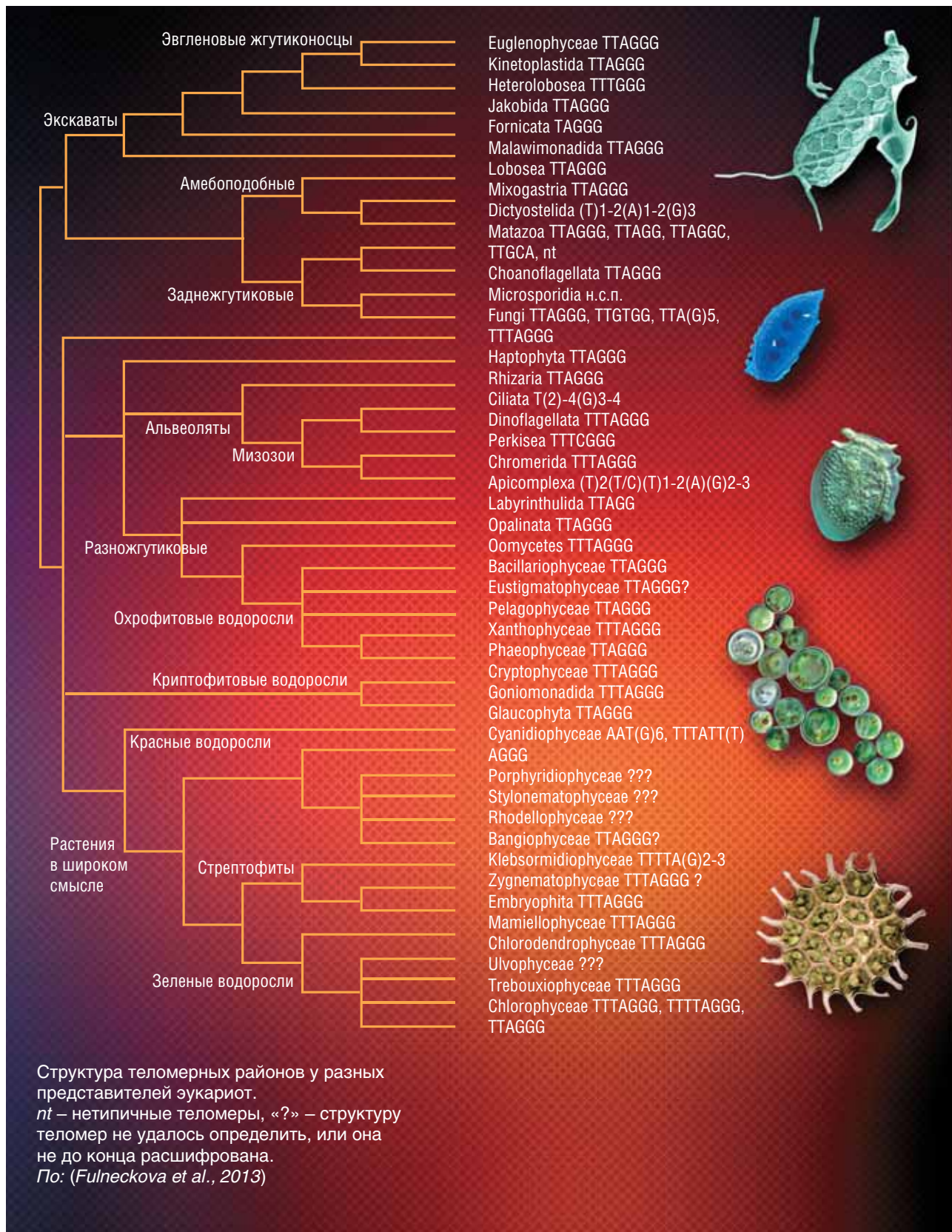
Alliaceae (луковые), Asphodelaceae (асфodelовые) и семейства Solonaceae (пасленовые): на концах их хромосом локализуются последовательности рибосомальной или сателлитной ДНК.

Более того, существуют промежуточные типы теломер: например, у тутового шелкопряда *Bombyx mori* теломерная ДНК состоит как из повторов TTAGG, так и из ретротранспозонов TRAS и SART – это говорит об эволюционной связи разных теломерных структур. У некоторых организмов определить структуру теломерных регионов пока не удалось: это тихоходки и поденки среди животных и, например, ульвовые и красные водоросли среди низших растений. Так что, возможно, существуют и другие варианты структуры теломерных районов.

Не только по структуре, но и по длине теломерные участки очень вариабельны. Размер теломер может отличаться на разных плечах одной хромосомы, у гомоло-

Схема строения теломеразы, фермента, который «пришивает» новые нуклеотиды к укорачивающимся при делении клетки теломерным участкам ДНК. Теломераза содержит короткую молекулу РНК, последовательность которой комплементарна теломерному повтору, и эта РНК используется как матрица для синтеза 3'-конца теломерной ДНК. Достроив один участок, теломераза сдвигается так, чтобы повторить цикл. Вторая цепь ДНК достраивается ДНК-полимеразой в ходе следующего деления клетки





гичных и негомолгичных хромосом, в разных клетках, тканях, органах, у близнецов, у разных индивидов, принадлежащих одному виду, у разных видов. С чем такая изменчивость связана и каково ее функциональное значение, до сих пор не понятно. При этом в исследованиях варибельность обычно не учитывают, используя в анализе средние значения размера теломер, который определяют, расщепив ДНК изучаемой ткани ферментами рестриктазами, не трогающими теломерную ДНК. Оставшуюся ДНК метят, визуализируют и с помощью специального прибора определяют длину фрагмента самой многочисленной фракции – это и будет средний размер теломер.

Длина теломер всегда вызывала и продолжает вызывать много вопросов. Почему у слона она составляет всего 14 тыс. пар нуклеотидов, а у некоторых линий лабораторных мышей – в 10 раз больше? Есть ли какая-нибудь связь с размером тела? С продолжительностью жизни? С приспособленностью к меняющимся условиям окружающей среды? С болезнями? С наследственностью? Со скоростью старения? Это лишь небольшой перечень вопросов, возникающих в отношении размера теломер, правда на некоторые из них ученые уже нашли ответы.

Размер теломер, размер тела и продолжительность жизни – есть ли связь?

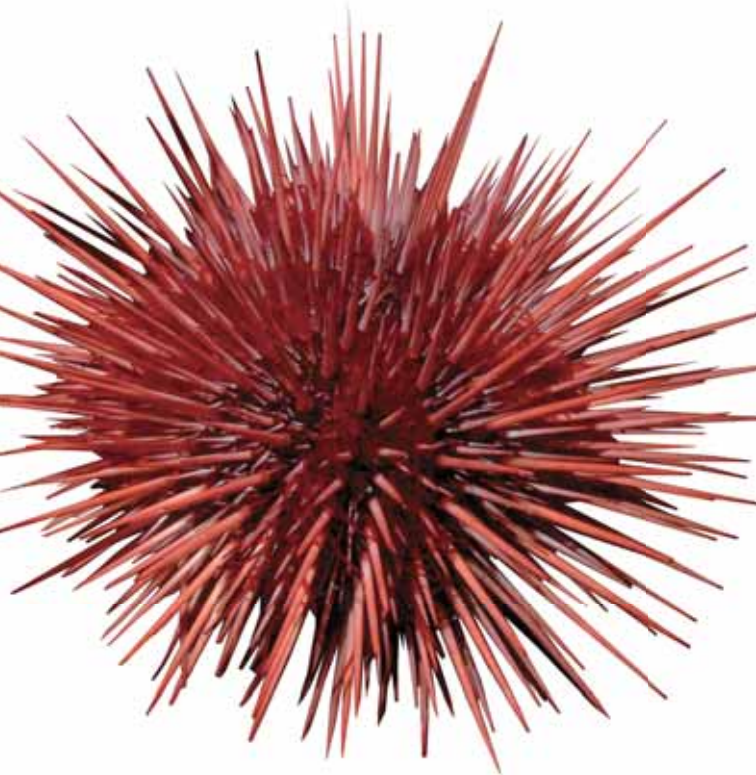
Как уже упоминалось выше, существует теория старения, согласно которой этот процесс происходит вследствие укорачивания теломер с возрастом из-за их неполного копирования в процессе удвоения ДНК. Теломеры называли (а некоторые до сих пор называют) митотическими часами клеток, хронометрами, счетчиками клеточных делений, потому что у человека в клетках тела они укорачиваются с возрастом. Родится человек с длиной теломер 15–20 тыс. пар нуклеотидов, а умирает с длиной 5–7 тыс. Сейчас известно, что зависимость размера теломер от возрастных изменений не универсальна, длина теломерной ДНК у разных организмов (а иногда и у одного и того же организма) может со временем не только уменьшаться, но и расти, а у многих организмов такой зависимости вообще нет. Но все же объяснить различия в длине теломер у разных организмов разной продолжительностью их жизни – красиво и логично. Может быть, долгожители имеют необычайно длинные теломеры? К сожалению, по пальцам одной руки можно пересчитать организмы-долгожители с длинными теломерами. Это некоторые виды долгоживущих (сто и больше лет) черепах с теломерами длиной 50–60 тыс. пар нуклеотидов, аллигаторы, живущие больше полувек



У комара рода *Chironomus* в роли теломер выступает сателлитная ДНК: повторы из нескольких сотен пар нуклеотидов образуют теломерные области в несколько сотен тысяч пар нуклеотидов.
 © Creative Commons

с теломерами размером около 30 тыс. пар нуклеотидов. Но у большинства других долгоживущих организмов теломеры довольно скромного размера. Например, у деревьев-долгожителей (более тысячи лет) сосны *Pinus longaeva* и гинкго *Ginkgo biloba* длина теломер составляет, соответственно, около 13 и 5 тыс. пар нуклеотидов. То есть длина теломер и продолжительность жизни не имеют явной связи. Другой вопрос, что эти организмы имеют активный механизм поддержания

Какие теломеры считать длинными, а какие не очень? Все известные значения размеров теломер условно можно разделить на четыре группы. Очень короткие – десятки пар нуклеотидов, характерные для большинства простейших; короткие – меньше 20 тыс. пар нуклеотидов; длинные – больше 20 и меньше 100 тыс. пар нуклеотидов; экстрадлинные, или мегателомеры, – больше 100 тыс. пар нуклеотидов

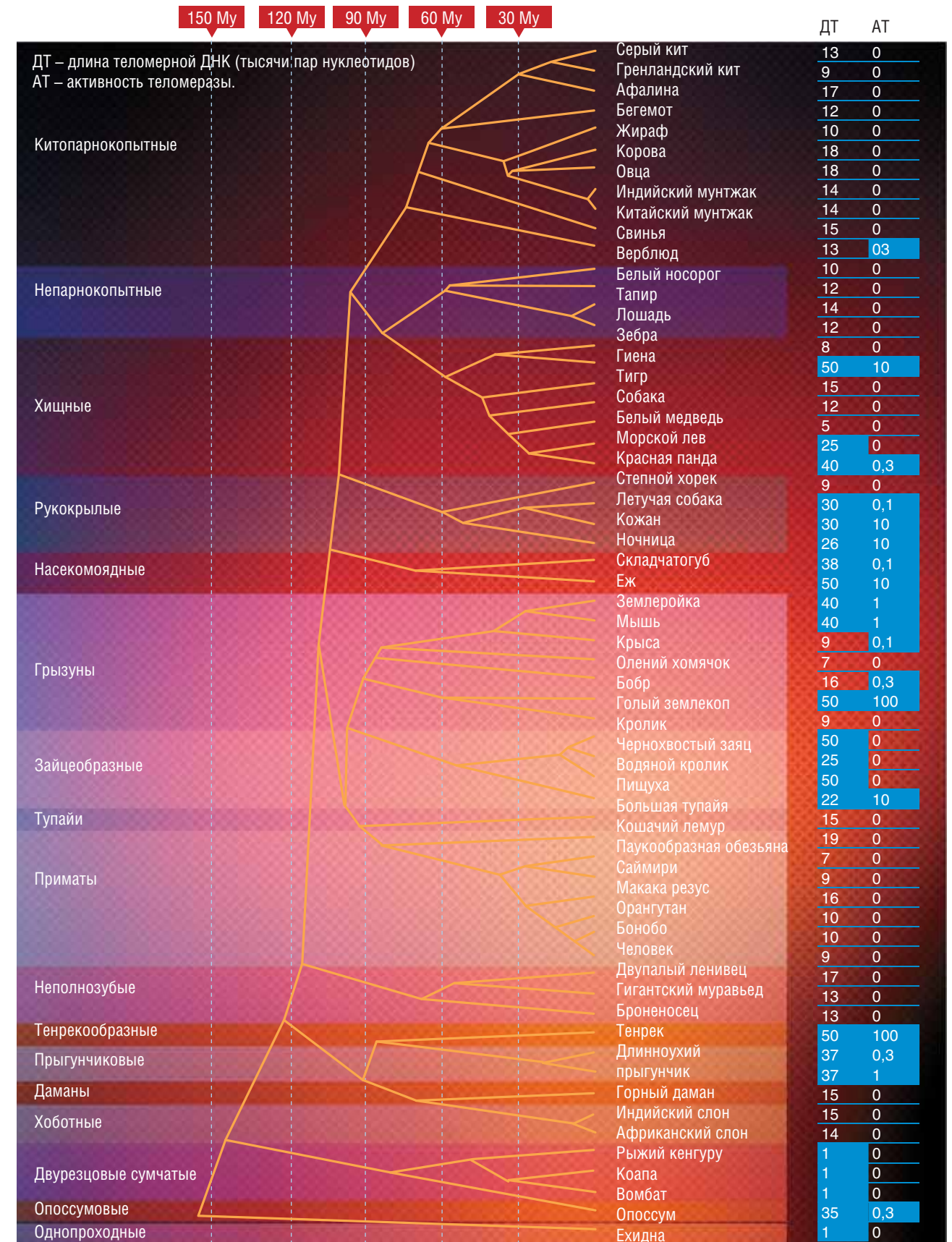


теломерных районов – фермент *теломеразу*, способную удлинять спонтанно укорачивающиеся при делении клетки теломерные участки ДНК, но это совсем другая история.

Больше повезло ученым, которые искали связь между размером теломер и размером организма. Сначала некоторая зависимость была обнаружена у грызунов:

У морского ежа *Strongylocentrotus franciscanus* (вверху), живущего более ста лет, размер теломерных районов составляет всего 5 тыс. пар нуклеотидов. А дерево-долгожитель сосна остистая межгорная (*Pinus longaeva*) при продолжительности жизни в несколько тысячелетий также имеет относительно короткие теломеры – 13 тыс. пар нуклеотидов (внизу).
© Creative Commons

У большинства исследованных видов млекопитающих длина теломер не превышает 20 тыс. пар нуклеотидов, и фермент теломераза не работает. Однако есть виды с длинными теломерами, а также с еще неизвестной структурой теломер. Синим цветом выделены значения длин теломер >20 тысяч пар нуклеотидов, а также наличие активной теломеразы.
По: (Gomes et al., 2011)

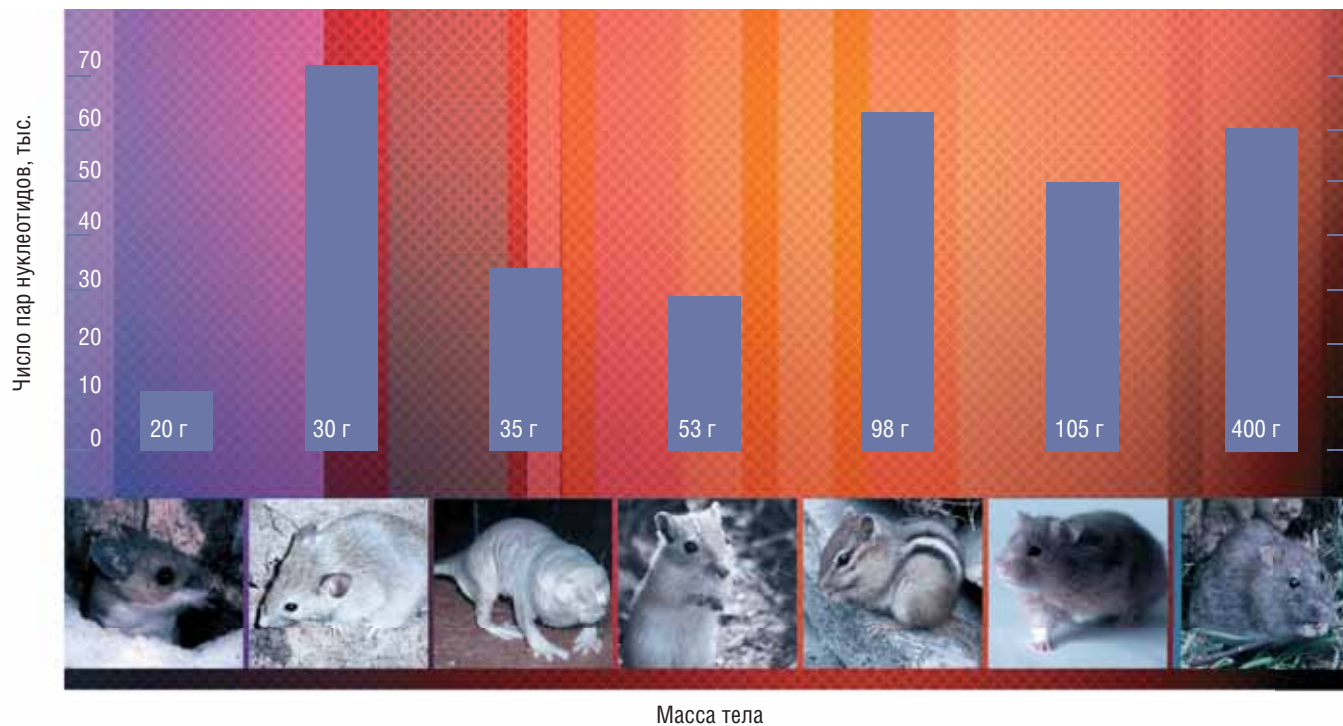


оказалось, что большинство крупных видов имеет короткие теломерные районы (10–18 тыс. пар нуклеотидов), а теломеры небольших грызунов могут достигать 72 тыс. пар (Seluanov *et al.*, 2007). Возникла гипотеза, что эти данные отражают имеющийся у крупных организмов механизм защиты от рака в виде репликативного старения, когда клетки теряют способность делиться. Ведь чем больше в организме клеток, тем больше риск, что какая-то из них переродится в раковую. Тогда все логично: теломерная ДНК должна иметь достаточно небольшую длину, чтобы при постепенном укорочении вовремя запустилось репликативное старение, при этом теломера, которая может поддерживать длину теломер (как в нормальных клетках, так и в раковых) должна быть неактивна.

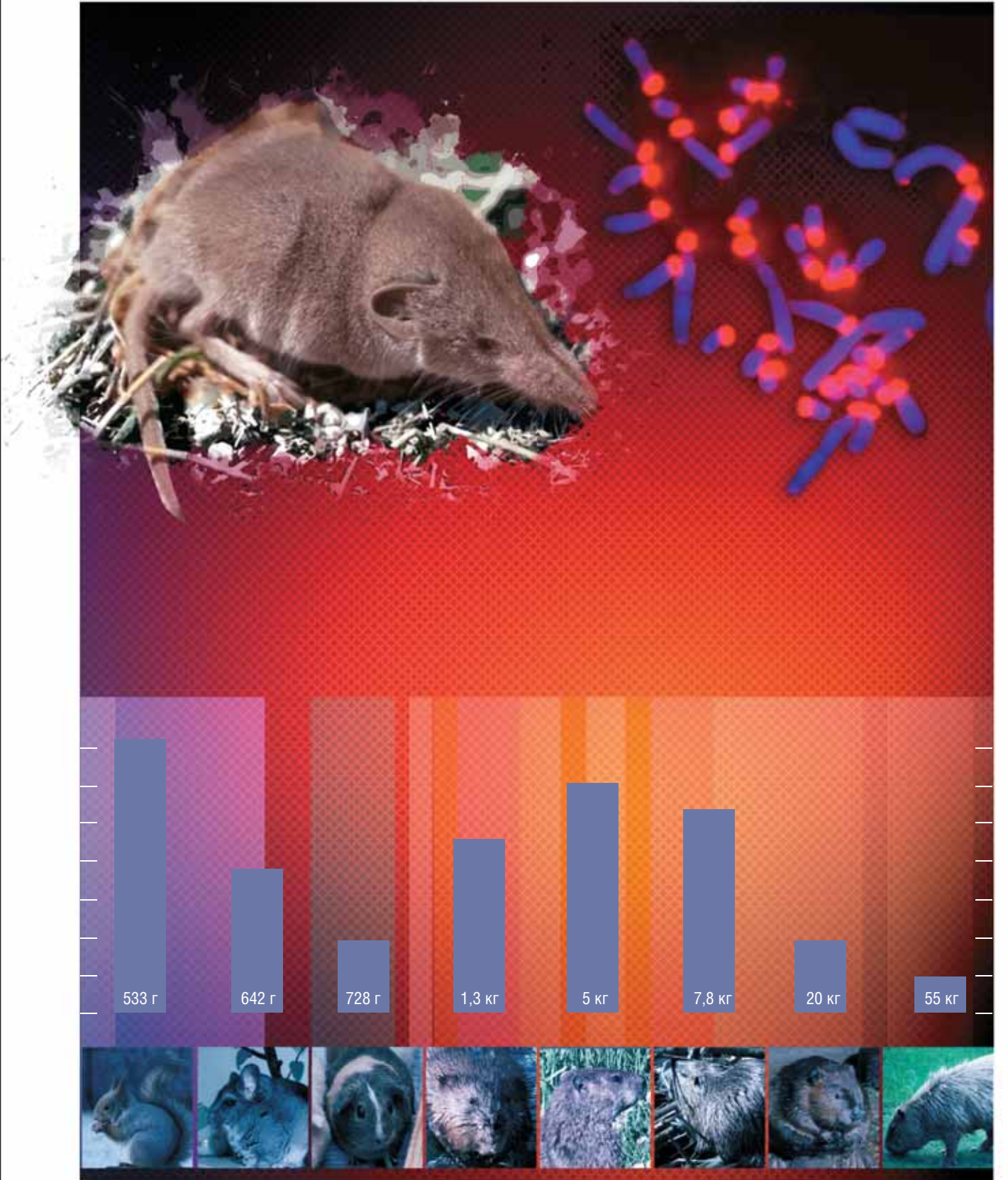
Исследования на других видах млекопитающих частично подтвердили данные, полученные на грызунах: длина теломерной ДНК действительно имеет отрицательную корреляцию с продолжительностью жизни и массой тела, и массивные животные с короткими теломерами не имеют активной теломеразы. Возможно, репрессия теломеразы и наличие более коротких теломер у крупных животных могут быть адаптацией к теплокровности, так как с увеличением температуры тела увеличивается частота мутаций и, следовательно, вероятность возникновения рака (Gomes *et al.*, 2011). У небольших млекопитающих репликативного старения, видимо, нет, а физиологические процессы регулируются иным образом.

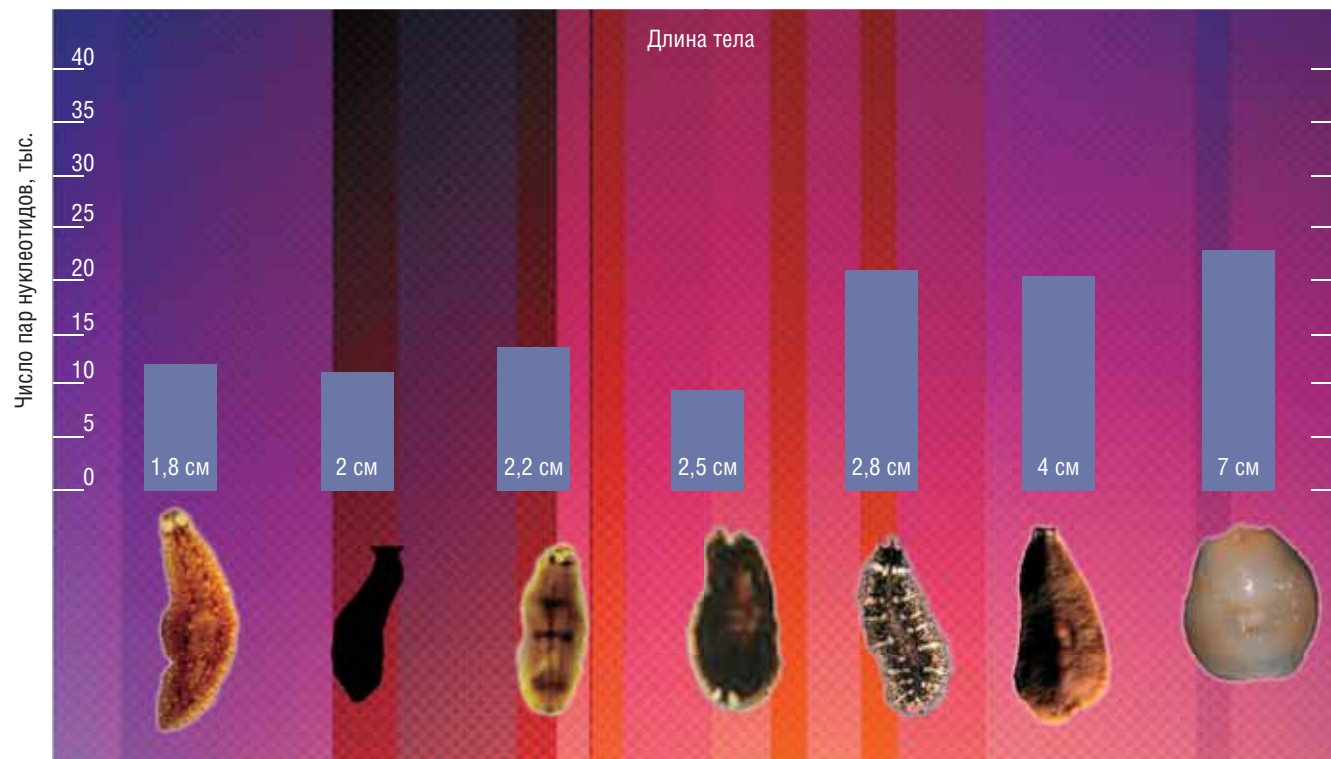
Конечно, предложенные объяснения имеют гипотетический характер, они не могут быть универсальными. Подтверждением этому служит, например, исследование длины теломер у байкальских планарий и моллюсков, при котором была обнаружена противоположная картина: более крупные животные имели более длинные теломеры, хотя не без исключений из правила.

Зависимость между длиной теломер и массой тела была обнаружена у группы грызунов: большинство крупных видов имеет короткие теломерные районы, и наоборот.
По: (Seluanov *et al.*, 2007)



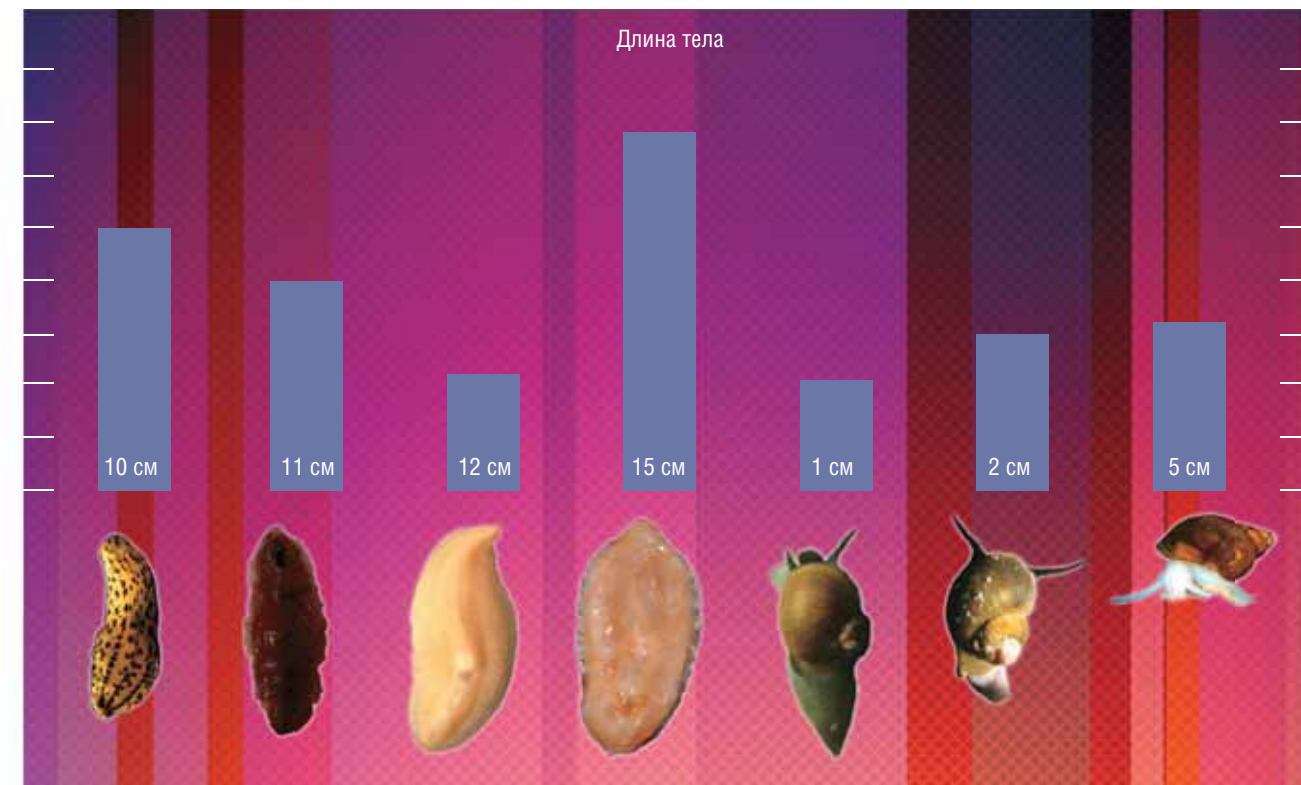
Бурозубка иберийская (*Sorex granarius*) и ее хромосомы с теломерами, окрашенными в красный цвет (флуоресцентная гибридизация *in situ* (FISH)). Видно, что теломеры значительно отличаются на разных концах хромосомы.
По: (Zhdanova *et al.*, 2007)





Наша работа в ЛИН СО РАН посвящена исследованию изменения длины теломерной ДНК и активности теломеразы у двух групп байкальских гидробионтов – планарий (плоских червей) и моллюсков. Эти организмы обитают в одинаковых условиях и подвергаются влиянию сходных факторов среды, демонстрируя такие свойственные байкальской фауне явления, как гигантизм и карликовость. Они имеют разную продолжительность жизни, которую у моллюсков, в отличие от планарий, можно точно определить, и различные стратегии выживания. Анализ динамики теломерной ДНК с учетом особенностей этих животных поможет оценить влияние на нее внешних и внутренних факторов. По предварительным данным, во-первых, более крупные виды имеют более длинную теломерную ДНК. Во-вторых, длина теломерной ДНК с возрастом у разных видов животных меняется по-разному: у одних она увеличивается, а у других – уменьшается.

Такая видовая специфичность размера и динамики теломерной ДНК может иметь как адаптивный характер, так и наследственный, определяемый филогенетическим родством. А исследование активности теломеразы, которое тоже планируется осуществить, может пролить свет на внутреннюю причину различий в возрастной динамике теломерной ДНК у разных видов



Соотношение длины теломер и размера тела обитателей Байкала – планарий и моллюсков

Нет сомнений, что теломеры вовлечены во многие процессы в клетке, поэтому так трудно найти закономерность в распределении их размеров, и тем более предложить теорию, которая бы обладала предсказательными свойствами. Пока остается лишь перечислять те взаимосвязи, которые все же удалось обнаружить в разных исследованиях.

Одно из таких открытий относится к экстрадлинным (до 1 млн пар нуклеотидов) теломерным районам, которые были обнаружены у некоторых видов птиц. В кариотипах у них присутствуют микрохромосомы, и, возможно, такие anomalно длинные теломеры нужны для их стабилизации.

Выше мы затронули лишь некоторые возможные варианты объяснений изменчивости размеров теломер и роли их длины в жизни организма, не коснувшись внутривидовых отличий, связанных с полом, репродуктивным успехом, условиями обитания, образом жизни и т. п. Но даже то, что уже сказано, дает представление о всей сложности и многогранности этой актуальной области биологии.

Литература

Зверева М., Рубцова М. Нобелевская премия по физиологии и медицине 2009 года. Счетчик клеточного времени // Наука и жизнь. 2010. № 1. С. 2–5.

Bombarova M., Vitkova M., Spakulova M. et al. Telomere analysis of platyhelminths and acanthocephalans by FISH and Southern hybridization // Genomes. 2009. V. 52. P. 897–903.

Fulneckova J., Sevcikova, Fajkus J. et al. A broad phylogenetic survey unveils the diversity and evolution of telomeres in eukaryotes // Genome Biol. Evol. 2013. V. 5, N. 3. P. 468–483.

Gomes N., Ryder O., Houck M. et al. Comparative biology of mammalian telomeres: hypotheses on ancestral states and the roles of telomeres in longevity determination // Aging Cell. 2011. V. 10. P. 761–768.

Seluanov A., Chen Z., Hine C. et al. Telomerase activity coevolves with body mass, not lifespan // Aging Cell. 2007. V. 6(1). P. 45–52.

Zellinger B., Riha K. Composition of plant telomeres // Biochim. et Biophys. Acta. 2007. N 1769 (5–6). P. 399–409.

Zhdanova N., Minina J., Karamisheva T. et al. The very long telomeres in *Sorex granarius* (Soricidae, Eulipotyphla) contain ribosomal DNA // Chromosome Res. 2007. V. 15. P. 881–890.

В. В. ВЛАСОВ

В окаменевших ЛЕСАХ АРИЗОНЫ

ВЛАСОВ Валентин Викторович – академик РАН, доктор химических наук, профессор, директор Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (Новосибирск). Увлекается туризмом, охотой и фотографией

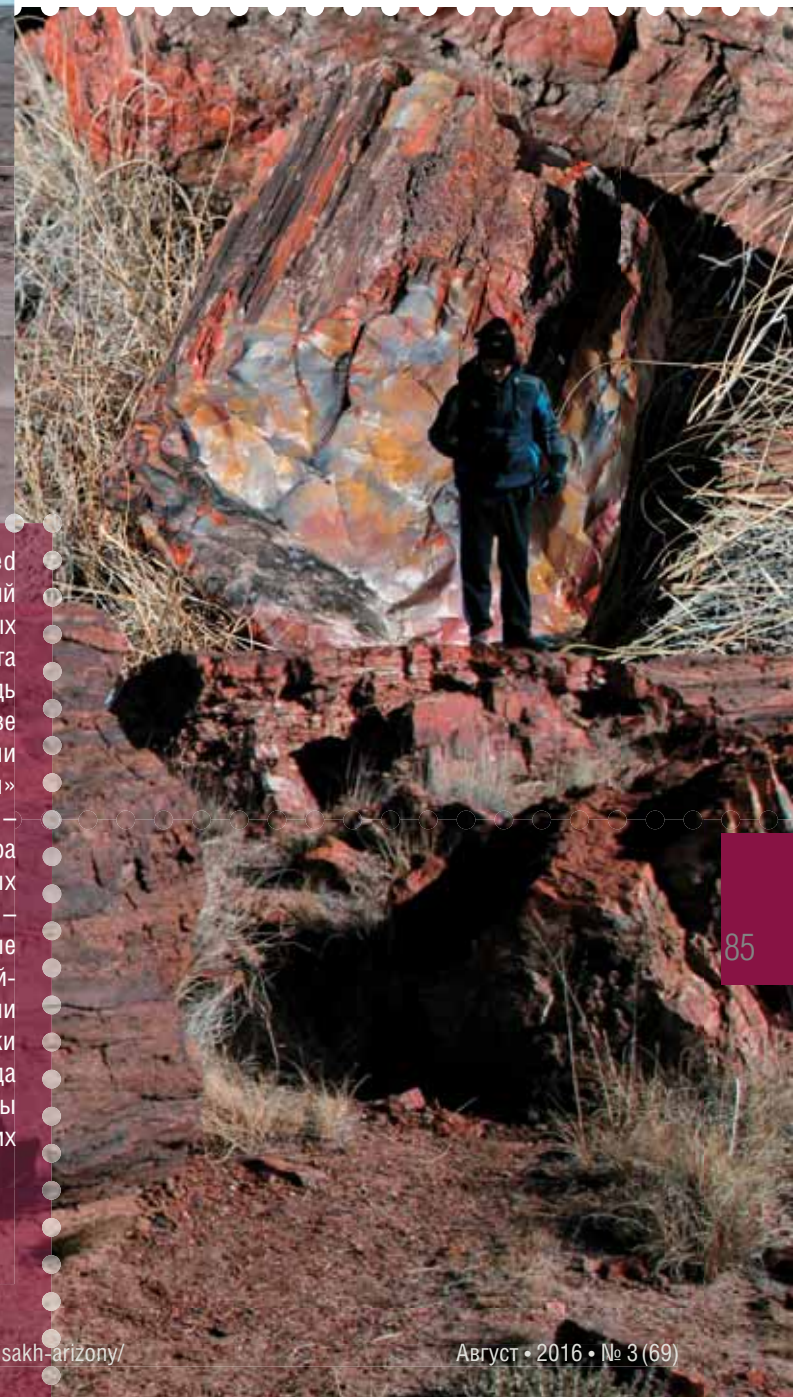
© В. В. Власов, 2016

Национальный парк Петрифайд-Форест (Petrified Forest – Окаменелый (Окаменевший) лес) – не самый большой, но один из самых необычных национальных парков США. Расположен он на северо-востоке штата Аризона недалеко от г. Холбрук, а его общая площадь составляет 380 км². Территория парка делится на две зоны – южную и северную. На северной территории располагается так называемая «цветная пустыня» с разноцветными бедлендами (от англ. badlands – «плохие» земли), особыми формами сухого рельефа в виде сети остроконечных холмов, разделенных оврагами. Но главная достопримечательность парка – удивительный «лес» из окаменелостей, в которые превратились останки древних представителей хвойных, папоротниковых и саговниковых, которые росли здесь около 220 млн лет назад. Окаменевшие останки этих растительных гигантов, под которыми некогда прогуливались динозавры, под действием ветра и воды вновь появляются на свет из толщи похоронивших их осадочных отложений

Ключевые слова: Петрифайд-Форест, окаменелое дерево, псевдоморфоза, кварц, опал, халцедон.

Key Words: Petrified Forest, petrified wood, pseudomorph, quartz, opal, chalcedony

Прекрасен и притягателен мир минералов, чудесным образом возникший в результате столкновений небесных тел или эволюционных процессов в горячих недрах Земли. Но оказывается, иногда минералы растут подобно деревьям практически в прямом смысле слова. Речь идет о так называемых окаменелых деревьях, когда органическое вещество древесины, погребенной под толщей осадков без доступа воздуха, за миллионы лет превращается в удивительной красоты минералы. Самым знаменитым месторождением таких деревьев является мечта каждого любителя природы – национальный парк Петрифайд-Форест в американском штате Аризона, где посчастливилось побывать нашему автору





Окаменелые деревья встречаются в осадочных и вулканогенных отложениях пермского и каменноугольного периода по всему миру. Как правило, в зонах повышенной магматической активности, где извержения вулканов происходили вблизи лесных массивов. Залежи окаменелых деревьев обнаружены в Бельгии и Канаде, Греции и Бразилии, в Новой Зеландии и на Мадагаскаре. В России каменные деревья находят в Вологодской и Новгородской областях, а также на Урале, в Средней Сибири, на Камчатке и в Приморье.

Наиболее известные окаменелые «леса» имеют статус памятников природы или национальных парков, самым знаменитым из которых по праву считается американский Петрифайд-Форест (*Petrified Forest*). Именно здесь еще в конце XIX в. экспедиция под командованием лейтенанта Э. Уиппла обнаружила первые россыпи окаменелого дерева, признанного по красоте цвета и рисунка лучшим в мире.

До того как в 1962 г. это месторождение окаменелостей было объявлено национальным парком, ему пришлось немало претерпеть от стихийного туризма и охотников за редкостями. В конце XIX в. по территории будущего парка была проложена сначала «верблюжья» тропа, а потом – железная и автомобильная дороги. И хотя уже в начале прошлого века Петрифайд-Форест был признан природным памятником, еще около полувека его земли использовались как пастбище. Говорят, что проезжающие мимо туристы грузили «сувениры»

Фантастический, труднопроходимый и чрезвычайно изменчивый рельеф парка Петрифайд-Форест сформировался благодаря размытию рыхлых осадочных пород, не закрепленных растительностью. Редкие в засушливом климате дождевые потоки не только прорезали разветвленную сеть оврагов, но и вымыли на поверхность древние окаменелости

прямо в вагоны, а огромные каменные стволы иногда взрывали, чтобы извлечь кристаллы полудрагоценных камней, в которые превратилась древесина.

Сейчас вынос образцов из парка считается преступлением, сам он окружен проволочной оградой и вечером закрыт для посетителей, а на его территории располагается лишь небольшой музей «Радужный лес» и нет ни одного туристского кемпинга. Несмотря на это, Петрифайд-Форест в наши дни ежегодно посещают более полумиллиона туристов, которых привлекают не только уникальные окаменелости, но и поразительные пейзажи «цветной пустыни», словно раскрашенные акварелью, а также древние петроглифы – следы присутствия первобытного человека.

В лесу динозавров

...Наше долгожданное путешествие наконец состоялось. Морозное декабрьское утро, встает солнце, и ледяные кристаллы сверкают на колючках засохших кустарников, острых камнях, устилающих холмистую





пустыню, и лежащих повсюду огромных стволах «каменных» деревьев. Зимой посетителей в парке немного, и охрана не очень усердствует: можно побродить не только по «официальным» пешеходным тропам, но и по «диким» участкам и даже взобраться на холмы, возвышающиеся над разноцветной пустыней.

Вид, открывающийся с этих холмов, поражает воображение: среди каменистых просторов, кое-где покрытых чахлой зимней травой, лежат бревна возрастом более сотни миллионов лет! Если закрыть глаза, можно представить, что когда-то здесь плескались теплые воды, а эти деревья были живыми зелеными великанами, под которыми бродили огромные динозавры...

Среди окаменелостей, обнаруженных на территории парка, идентифицировано не менее девяти видов деревьев. Чаще всего встречается вид *Araucarioxylon arizonicum*, в латинском названии которого («древесина араукарии») отражено родство этих палеозойских пред-

Высота этих деревьев – родственников араукариевых – достигала при жизни нескольких десятков метров

ставителей голосемянных растений с современными араукариевыми, относящимися к хвойным породам. Также идентифицированы окаменелости нескольких видов папоротников, плауновидных и других палеозойских растений и, конечно, ископаемых животных – гигантских родственников крокодилов, динозавров, моллюсков и насекомых.

Но все же главное, что видишь вокруг, – это огромные окаменелые останки так называемых «араукарий». Эти деревья в свое время вырастали почти до стометровой высоты, а сегодня их стволы, лишенные веток и сучьев, разбросаны по пустыне как обычные бревна, оставшиеся после давнего лесоповала. Большинство





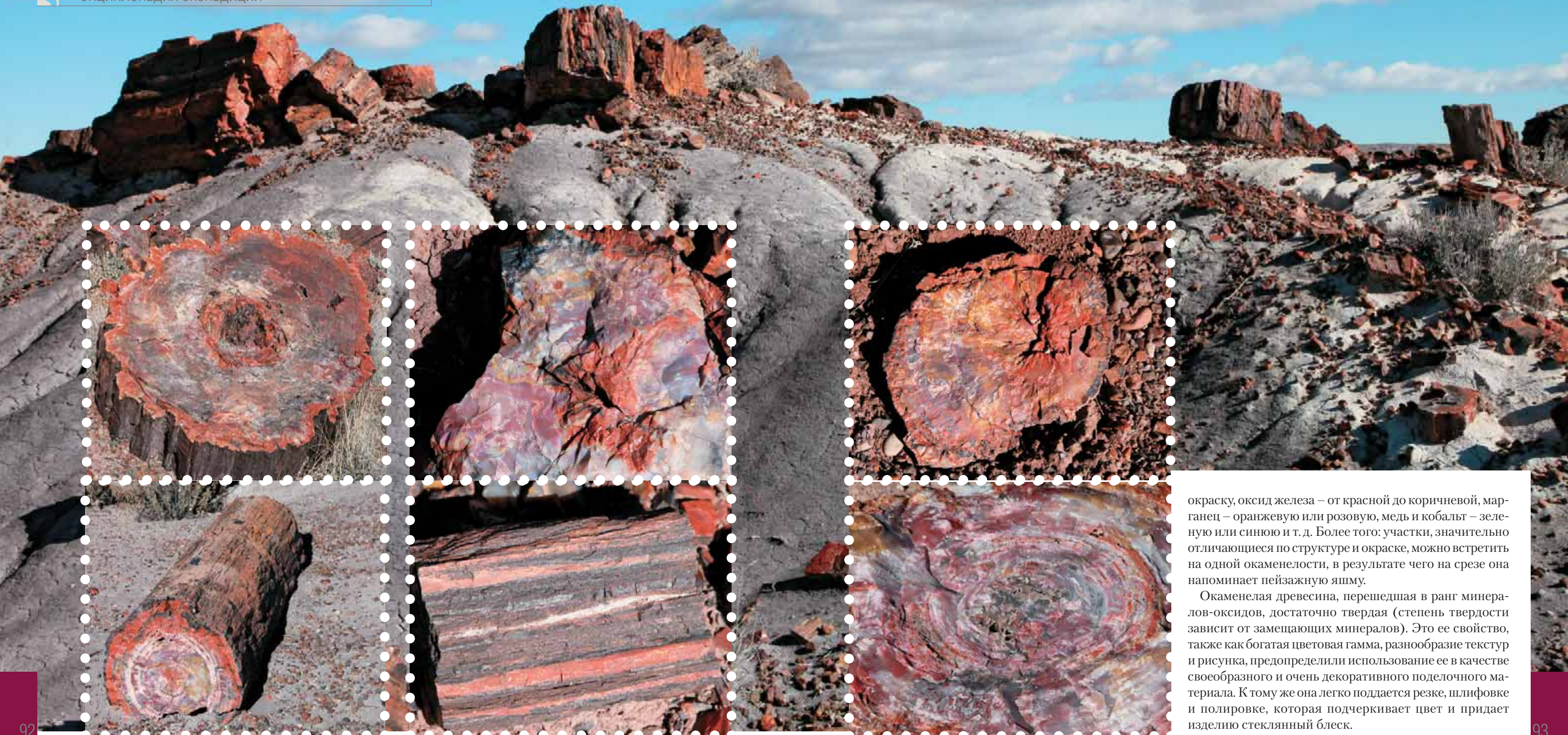
бревен расколоты на фрагменты разной величины, наиболее крупные из которых достигают в толщину 1–3 м, а в длину – 60 м. На срезах многих из них отчетливо прослеживаются годовые кольца и характерная волокнистость, однако уже первое прикосновение разрушает иллюзию – на ощупь это не «теплое» дерево, а холодный камень.

Как появились на свет такие поразительные природные экспонаты? Около 200–250 млн лет назад эта пустыня представляла собой речную пойму с мягким тропическим климатом, покрытую густыми лесами. Разливы рек, вызванные штормовыми дождями, намывали грязь и другие отложения в низинах. Огромные деревья, умирая, падали в воду и скопления грязи, где их заносило глиной, песком и вулканическим пеплом. В таких бескислородных условиях гниение древесины задерживалось, и в результате сложных физико-химических процессов она медленно превращалась в камень, сохраняя первоначальную «живую» форму.

В итоге залежи окаменевших деревьев оказались «законсервированы» в 240-метровой толще спрессованных слоев осадочных пород, которые спустя миллионы лет в результате поднятия литосферы оказались на возвышенности. Постепенно разрушаясь с образованием разноцветных холмов и оврагов, они вновь выносятся на дневную поверхность захороненные некогда деревья.

Как рождается каменный цветок

Процессы превращения дерева в камень сегодня хорошо изучены. Как известно, в обычных условиях мертвая древесина разрушается под действием насекомых и микроорганизмов (бактерий и грибов), однако если она попадает в условия, исключающие гниение и углефикацию, то начинается медленный процесс превращения растительных тканей в камень. Кстати, говорить о «превращении» в данном случае неверно – речь идет о замещении, иначе говоря, образовании так называемой *псевдоморфозы*.



Когда древесина оказывается захороненной в результате обвала, наводнения, вулканического извержения и других катастрофических явлений, доступ кислорода к ним прекращается, и начинается процесс низкотемпературного метаморфизма. В результате под действием насыщенного минерального раствора, просачивающегося сквозь осадочные отложения, углерод тканей замещается на другие элементы, такие как кремний или кальций. Образовавшиеся псевдоморфозы, как правило, практически полностью сохраняют перво-

начальную органическую форму. Все эти окаменевшие сучки и кора, годовые кольца и следы деятельности насекомых являются источником уникальной научной информации.

На сегодня известно несколько десятков минералов, которые встречаются в древесных окаменелостях, но чаще всего, как и в случае окаменелых деревьев парка Петрифайд-Форест, это кремнийсодержащие виды – плотный микрокристаллический *кварц*, *опал* (микрокристаллический волокнистый кварц) и *хал-*

цедон (аморфный гидратированный кремнезем). Реже встречается мраморизированное дерево, основными замещающими минералами в котором являются не кремнезем, а силикаты, такие как доломит и кальцит. Замещающими минералами в окаменелой древесине, обнаруженной на территории России и в Новгородской области, является пирит, в Вологодской области в ней встречается аметист.

За счет примесей окаменевший материал может иметь самые разнообразные цвета: углерод дает черную

окраску, оксид железа – от красной до коричневой, марганец – оранжевую или розовую, медь и кобальт – зеленую или синюю и т. д. Более того: участки, значительно отличающиеся по структуре и окраске, можно встретить на одной окаменелости, в результате чего на срезе она напоминает пейзажную яшму.

Окаменелая древесина, перешедшая в ранг минералов-оксидов, достаточно твердая (степень твердости зависит от замещающих минералов). Это ее свойство, также как богатая цветовая гамма, разнообразие текстур и рисунка, предопределили использование ее в качестве своеобразного и очень декоративного поделочного материала. К тому же она легко поддается резке, шлифовке и полировке, которая подчеркивает цвет и придает изделию стеклянный блеск.

Неудивительно, что украшения из окаменелого дерева носили еще в Древнем Риме и античных государствах Междуречья. Спрос на них не падает и сегодня. Разновидности с мелким контрастным рисунком используются для изготовления ювелирных изделий, с крупнопятнистым рисунком – для крупных декоративных изделий – ваз, подсвечников, шкатулок. Особо ценится камень с четко выраженными линиями годовых колец. Замечательно красивые и не менее дорогие столешницы получаются из крупных стволов: самая лучшая из тех, что мне довелось увидеть, стоила около 400 тыс. долларов.

Древесина этих деревьев, живших более 200 млн лет назад, превратилась в полудрагоценные и поделочные камни — опал, халцедон и кварц, сохранив при этом свою природную форму



В древности из окаменелой древесины делали домашние обереги в виде фигурок богов или животных, которые должны были охранять жилище человека от пожаров, молний и наводнений, а кольца и браслеты носили для защиты от воров и грабителей. Окаменелому дереву издавна приписывались и особые лечебные свойства. Бусы из него носили как залог долголетия, так как считалось, что они помогают противостоять стрессам и нормализуют кровяное давление.

Монгольские целители прикладывали к больным суставам пластинки окаменелого дерева из пустыни Гоби. Помогает ли такое дерево при болях в суставах и от воров, сказать трудно, но снимать стрессы, пируя за сверкающим разноцветным каменным столом, наверное, получается неплохо. И все же для снятия нервного напряжения нет ничего лучше путешествия в каменные «леса», где ты можешь своими руками потрогать застывшее время и взглянуть на окружающий мир другими глазами.



В мире науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Ежемесячный
научно-
информационный
журнал

www.sci-ru.org

№7 2016

Темы номера

Рождение из хаоса

Структура Солнечной системы с ее небольшими каменными внутренними телами и внешними гигантами аномальна в сравнении с большинством других планетных систем, имеющих совершенно иную архитектуру. Последние наблюдения открывают новые детали динамичной и бурной истории формирования Солнечной системы.

Языковые войны

Откуда происходит самая успешная в мире семья языков — индоевропейская? В лингвистике уже давно существуют две конкурирующие гипотезы: центральноазиатская и анатолийская. Попытка внести ясность в вопрос с помощью данных эволюционной биологии и анализа древних образцов ДНК лишь обострила дискуссию.

Квантовые связи

Построить квантовый компьютер больших размеров не так-то просто, поскольку крупные скопления частиц обычно прекращают вести себя по законам квантовой механики. Выход из положения — следующий: создать множество маленьких квантовых компьютеров и объединить их в сеть.

Спасти Эдем

Защитники природы выступают за то, чтобы дикая природа Мьянмы в целях ее сохранения была доступна только для экотуризма.

Зуд, сводящий с ума

Острое ощущение зуда призвано сигнализировать нам о том, что мы вступили в контакт с насекомым или ядовитым растением. В науке только сейчас начинает возникать понимание того, откуда берется зуд и как с ним бороться.

Лекарство для земель Африки

Выращивая деревья, кустарники и другие многолетние растения на полях с сельхозкультурами, африканские фермеры могут вдохнуть новую жизнь в сильно истощенную почву, при этом не теряя урожай.



Хотите знать о науке больше?

Полный архив выпусков журнала «В мире науки» —
на сайте издания по адресу:

www.sciam.ru/projects/dvd-electronic-catalogue

В мире
науки

SCIENTIFIC
AMERICAN

Архив



Перламутровый Байкал. Фото В. Короткоручко

ISSN 18-10-3960



9 771810 396034 69