

Познавательный журнал для хороших людей

НАУКА

из первых рук

www.scfh.ru

2⁽⁶⁸⁾
● 2016

АВОСЬКА
И АВОСЬ

«ЖИВОЙ»
КРЕМНИЙ
БАЙКАЛА

ЗАГАДКИ
БАЙКАЛЬСКОЙ
СПИРОГИРЫ

ЧЕМ ДЫШАТ
БАЙКАЛЬСКИЕ
ЧЕРВИ

Я ЕСТЬ!





Восьмиклассницы считают бляшки.
День российской науки в Лимнологическом институте СО РАН.
Иркутск, февраль 2016 г.

На первой странице обложки:

Байкальская эписура (*Epischura baicalensis*).
Сканирующая электронная микроскопия

2. 2016
научно-популярный журнал



НАУКА

из первых рук



В НОМЕРЕ:

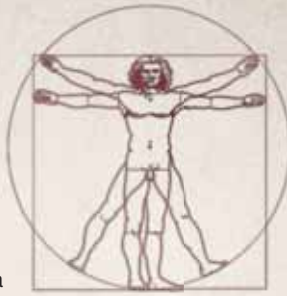
Академик М.А. Грачев: «Кризис я называю “загадкой” века, поскольку, по крайней мере, за 100 последних лет научных наблюдений на Байкале подобной беды не случилось ни разу»

Определить вид «подозреваемой» в причинах кризиса на Байкале, печально известной водоросли спиругиры, можно только «застукав» ее на стадии полового размножения

Обонятельные нейроны желтокрылых широколобок во время нереста способны видоизменяться: рецепторные клетки становятся секреторными и начинают выделять молекулы в окружающую среду

«Кремниевые нанотехнологии» диатомовых микроводорослей могут стать основой принципиально новых биотехнологических производств

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. Афтанас

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. Соيفер (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

д. б. н. Е. Лихошвай
к. б. н. Л. Овчинникова
Л. Панфилова

к. б. н. М. Перепелчаева
к. х. н. С. Прокопьев
Е. Сычева
А. Харкевич
А. Владимиров
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 10.06.2016

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!

Двенадцать лет назад мы посвятили один из первых выпусков нашего журнала Байкалу – самому древнему и глубокому из всех пресноводных озер планеты, занимающему среди них первое место по биоразнообразию. Более половины видов байкальских животных и до 10% растений – эндемики, т. е. не встречаются больше нигде в мире.

На страницах нашего журнала Вы могли прочитать о штаммах бактерий-деструкторов углеводов, адаптированных к очень низким температурам, представляющих большой интерес для создания биотехнологических препаратов для очистки от нефтяных загрязнений («Невидимые защитники Байкала» О. Павлова); сообществах ледовых «джунглей», обитающих в порах и капиллярах тающего льда («Лед – хранитель жизни» Л. Оболкина и О. Тимошкин); о «метановых консервах» – газогидратах, впервые поднятых со дна пресноводного озера в 1997 г.; об уникальной многокилометровой летописи осадочных отложений, которую помогают читать диатомовые водоросли, и о многих других феноменах Байкала.

В 2011 году «НАУКА из первых рук» стала первым официальным СМИ в России, опубликовавшим сообщение о первых симптомах тревожных событий на Байкале – болезни и гибели эндемичных губок-фильтраторов, поддерживающих чистоту озера (А. Бормотов «Что случилось с байкальскими губками?»).

В ходе последних экспедиций иркутского Лимнологического института СО РАН выяснилось, что негативные явления охватили мелководье Байкала по всему периметру озера длиной 1,8 тыс. км. Тысячи тонн гниющей спиригиры покрыли берега озера, а байкальские подводные пейзажи неузнаваемо изменились из-за гибели «лесов» из губок и толстого слоя слизи, покрывшей прибрежное дно.

О причинах столь быстрых изменений выдвинуто много гипотез. Некоторые из них ссылаются на предыдущие этапы потепления и сходные изменения или более катастрофическое глобальное потепление и истончение озонового слоя. Есть и более экзотические, например, возвращение на Байкал огромных стай бакланов или вселение нового вида спиригиры. И все же наиболее вероятной причиной, по мнению специалистов иркутского Лимнологического института, служит избыточное поступление в озеро биогенных элементов (азота и фосфора) вместе с плохо очищенными промышленными и, особенно, бытовыми стоками. Но этот, на первый взгляд, простой ответ порождает много новых вопросов.

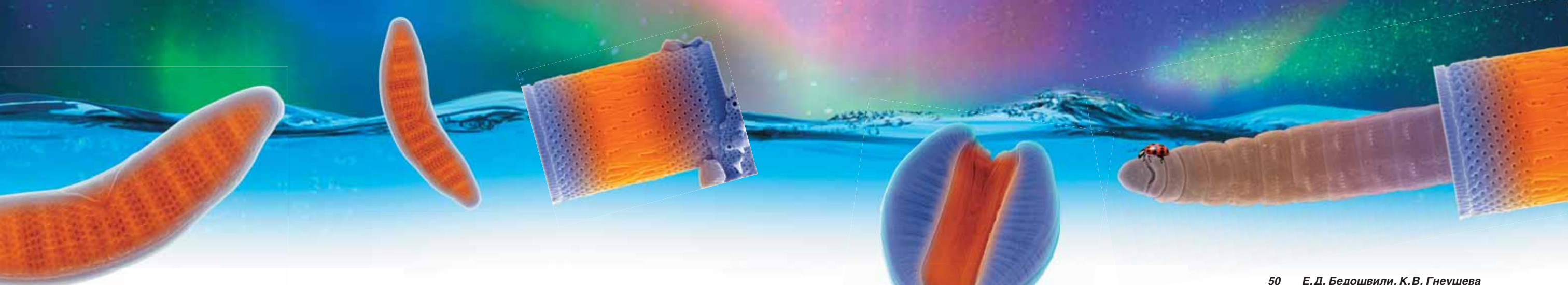


Почему загрязненная вода мелководий не обменивается с водой открытого Байкала? Как связаны между собой все кризисные события, которые происходят практически одновременно? Какие механизмы лежат в основе стабильности экосистемы озера, и чего нам ожидать в ближайшем будущем? Ответа на эти вопросы пока нет.

В новом выпуске журнала молодые ученые Лимнологического института СО РАН вместе со своими руководителями академиком М. А. Грачевым и доктором биологических наук Е. В. Лихошвай рассказывают о предмете своих исследований – удивительных обитателях Байкала, которые по-прежнему делают свою невидимую, но нужную озеру работу. Вы узнаете о кремниевых коронках на «зубах» у крошечного рачка эпишуры, одного из главных фильтраторов озера и основного корма байкальского омуля; о роли байкальских рыб в борьбе с атеросклерозом и возрастной деменцией; о том, что видовая идентификация печально известной спиригиры возможна только на стадии полового размножения, и как молодые ученые научили спиригиру размножаться в неволе; о расшифровке полного генома байкальской диатомовой водоросли *Synedra acus* и необычной структуре генов, кодирующих белки транспорта кремния у диатомей, известных совершенными «кремниевыми нанотехнологиями», воспроизвести которые пока не удается ученым.

Несмотря на все свои проблемы, Байкал продолжает жить, а лимнологи – исследовать механизмы функционирования этой сложной системы, где бесконечно большие последствия могут порождаться бесконечно малыми причинами.

Академик Н. Л. Добрецов,
главный редактор



.01

БАЙКАЛ КАК ПРИРОДНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

- 6 **М.А. Грачев**
«Авоська и авось» Экологический кризис на Байкале: загадка века
- 20 **Е.А. Волкова**
Загадки байкальской спиригиры
- 30 **Ю.Р. Захарова**
Как компьютер «уболтал» спиригиру размножаться в неволе
- 32 **И.В. Клименков**
От обоняния рыб к восстановительной медицине
- 42 **Н.П. Судаков, И.В. Клименков, М.В. Пастухов**
Рыбы Байкала в борьбе с атеросклерозом. О новом экспериментальном объекте для медицины
- 48 «Живой» кремний Байкала

Если добавить **ИКРУ САМКИ** желтокрылой широколобки в аквариум, где сидит готовый к нересту **САМЕЦ**, то он, ведомый **ЗАПАХОМ**, даже не видя объекта своего обожания, начинает мелко вибрировать телом, «вхолостую» выделяя **ПОЛОВЫЕ ПРОДУКТЫ**. **С. 32**

Чтобы раскусить «**ДОМИК**» из диоксида **КРЕМНИЯ**, в котором прячутся диатомовые водоросли, крохотный **БАЙКАЛЬСКИЙ РАЧОК** эпишура отрастил себе кремниевую «зубную» коронку. **С. 72**

У пресноводной **ДИАТОМОВОЙ** водоросли обнаружены «нестандартные» **ГЕНЫ**, обеспечивающие перенос **КРЕМНИЕВОЙ** кислоты из окружающей среды в клетку. **С. 64**

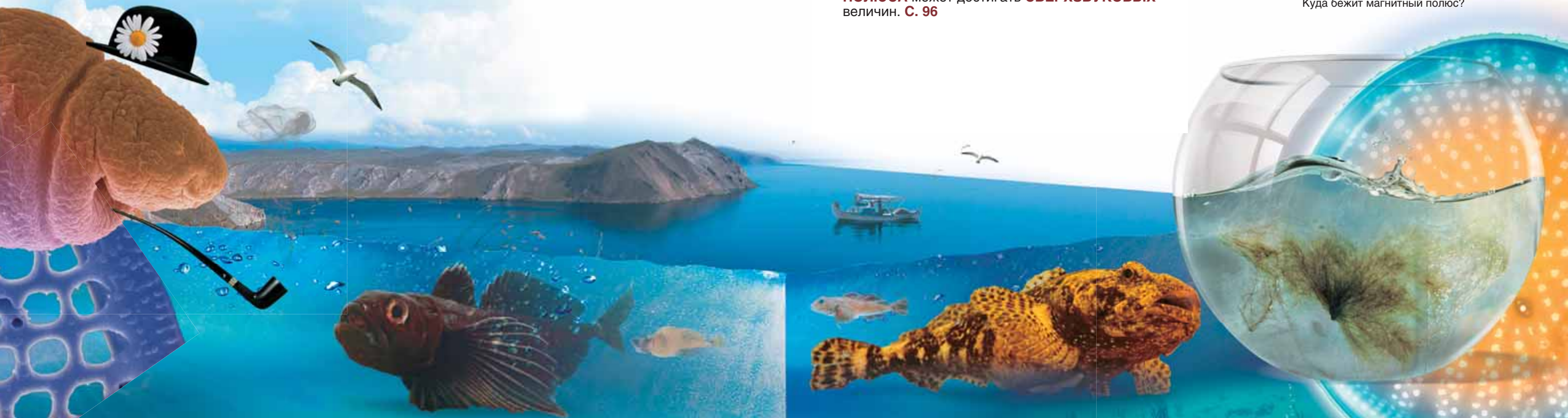
Скорость движения северного **МАГНИТНОГО ПОЛЮСА** может достигать **СВЕРХЗВУКОВЫХ** величин. **С. 96**

- 50 **Е.Д. Бедошвили, К.В. Гнеушева**
Кремниевые нанотехнологии «в пробирке»
- 60 **А.А. Морозов**
Зачем «читать» геном *Synedra acus*?
- 64 **Д.П. Петрова, А.М. Марченков**
Белки-транспортёры кремния: долгий путь к открытию
- 72 **И.Ю. Зайдыков**
Зачем чистильщику Байкала зубные коронки
- 78 **Ю.М. Зверева**
Чем дышат байкальские черви?
- 86 **Е.В. Лихошвай**
Мы есть!

02.

ВСЕЛЕННАЯ

- 96 **Н.Н. Семаков, А.А. Ковалев, А.Ф. Павлов, О.И. Федотова**
Куда бежит магнитный полюс?



М. А. ГРАЧЕВ

«Авоська и авось»

Экологический кризис на Байкале: Загадка века

Фото В. Короткоручко

Авоська, или сетка, – разговорное название сетчатой, сплетенной из суровых нитей хозяйственной сумки, используемой преимущественно для посещения рынков и магазинов, для туристических поездок. В сложенном виде авоська занимает очень мало места, и поэтому ее удобно брать с собой в дамскую сумочку. Во времена дефицита в Советском Союзе люди зачастую постоянно носили авоську с собой на случай – авось-ка удастся что-то купить (обычно в обеденный перерыв или по дороге с работы домой). Кроме того, в советских магазинах не было полистиленовых сумок-пакетов для покупок, и сумку нужно было иметь при себе. В СССР авоськи плели на предприятиях Всесоюзного общества слепых (ВОС). Котомка классической авоськи сплетена в 14 рядов по 24 ячейки. Максимальная нагрузка – 70 кг. Срок службы 20 лет.

По: Википедия

Пролог

По телевидению показывают жуткую картину: в океанах образовались три огромных горы пластикового мусора, в основном использованных пластиковых бутылок и пакетов. Разлагается пластик медленно и дает мельчайшие чешуйки, которые заглатывают рыбы и другие обитатели океана и гибнут в страшных мучениях.

Ни иностранцы, ни наши молодые люди уже не помнят, что такое авоська.

Очевидное решение: запретим пластиковые мешки во всем мире. Дадим всем авоськи и пластиковые бутылки заменим на стеклянные, и, авось, мусора в океане не будет. Так-то оно так, но тем не менее, однако... Не все так просто. Производство пластика приносит огромные прибыли, создает миллионы рабочих мест. Пока человечество не откажется от модели безудержного потребления, быть в океане мусору, гибнуть в океане рыбам и ракам ...



ГРАЧЕВ Михаил Александрович – действительный член РАН, доктор химических наук, директор Лимнологического института СО РАН (Иркутск) с 1987 по 2015 г. Основные научные интересы – биоорганическая химия, палеоклимат, аналитическая химия. М. А. Грачев принимал активное участие в подготовке Закона об охране озера Байкал. Лауреат Государственной премии СССР (1985 г.), лауреат премии им. А. П. Карпинского (1998 г.). Автор и соавтор 153 научных работ

© М. А. Грачев, 2016

Экологический кризис на Байкале

Начавшийся в 2011 году экологический кризис на Байкале многократно описан в научной литературе моими коллегами и другими учеными, а также в прессе; о нем говорят по радио и телевидению. О нем постоянно напоминают неправительственные организации, например, предводитель Северобайкальского природоохранного движения А. В. Тиссен. Причина его не ясна. Кризис крупномасштабный, охватил все мелководье Байкала по всему периметру длиной 1800 км. Коровы и лошади воду не пьют, люди не могут пить воду даже после кипячения. Купальщик поскальзывается, когда входит в воду. В журнале *National Geographic* байкальская субстанция названа слизью, которая покрывает дно. Дайверы раньше видели предметы на расстоянии 20–30 м, теперь видимость иногда падает до 2 м. Такой вот участок Мирового природного наследия ЮНЕСКО...

Дам только краткое перечисление фактов:

- необузданное развитие необычной для Байкала нитчатой зеленой водоросли спиригиры – тысячи и тысячи тонн;
- гибель почти всех байкальских губок, принадлежащих к нескольким эндемичным видам;
- исчезновение августовского стада байкальского бычка-желтокрылки, одной из кормовых баз омуля;
- неумеренное развитие цианобактерий на больных и мертвых губках и на грунте; образование толстых скользких водорослево-бактериальных матов;
- появление цианобактерий, выделяющих смертельно опасные нервно-паралитические яды сакситоксины.

Все это происходит в прибрежной мелководной зоне шириной порядка 100–200 м и глубиной до 25–50 м, на эту глубину еще проникает нужный для развития спиригиры солнечный свет.

Пелагиаль Байкала – его глубоководная зона – пока не пострадала; не изменилась ни химия воды, ни фитопланктон, ни изобилие омуля, ни благополучие байкальского тюленя. Это не мое мнение, а факты.

На наших четырех научно-исследовательских судах мы провели за последние четыре года 50 экспедиций, еще несколько экспедиций – по льду; сделаны лабораторные анализы, расчеты с участием не менее 50 наших и 10 иностранных ученых и отечественных узких специалистов. Наши водолазы совершили около 200 опасных погружений на глубины до 50 м. Очень помогло нам Федеральное агентство научных организаций, ФАНО, – оплатило все топливо, закупило

«Крепостные стены» Усть-Анги. Фото В. Короткоручко





Анжелика Васильевна Тиссен, лидер общественной организации «За чистый Северный Байкал» (г. Северобайкальск)

Анжелика Васильевна Тиссен, 1971 г. р., окончила Иркутский сельскохозяйственный институт по специальности «Биолог-охотовед», работала психологом в военкомате, инженером-программистом в «Бурятэнерго», предпринимателем. В настоящее время возглавляет находящуюся в Северобайкальске общественную организацию «За чистый Северный Байкал». В 2011 г. именно она обнаружила массовые выбросы погибшей спиригиры на северо-западном побережье Северного Байкала и добилась приезда федерального природоохранного инспектора Е. А. Иванова. Инспектор убедился в том, что А. В. Тиссен права и обратился в наш институт, чтобы мы помогли разобраться в ситуации. С 2011 г. по настоящее время А. В. Тиссен беспокоит все уровни власти и просит помочь и спасти Байкал, и не без успеха. Недавно она встречалась с Главой Республики Бурятия В. В. Наговицыным. Вячеслав Владимирович, мудрый человек, сказал ей: «Что ты беспокоишься,



Байкальский прибой. Фото В. Короткоручко



пройдет время, и кризис пройдет. Возле Байкала есть озеро Котокель, и несколько лет назад там тоже был экологический кризис. Наука подняла большую тревогу, точную причину ученые тогда не установили, и мы не делали почти ничего. Сейчас Котокель снова чистый, все в порядке».

И действительно, ученые сейчас не знают, какова точная причина байкальского кризиса, и найти ее – дело чести науки

◀ Глава Республики Бурятия В. В. Наговицын
© Правительство Республики Бурятия

запчасти для импортных приборов, разрешило ввести дополнения в государственные задания.

Байкал – это сложная система; не «очень сложная», а сложная. Это не эпитет, а математический термин.

Английский физик Исаак Ньютон (1643–1727) писал: «Дайте мне координаты и импульсы всех частиц во вселенной, и я вам опишу все ее прошлое и предскажу все будущее». Неправ был старик, нельзя этого сделать, но не потому, что приборов, наблюдателей и компьютеров у нас недостаточно, а по принципиальным причинам. Все реальные системы в нашем мире сложные, неравновесные, и точное предсказание их поведения принципиально невозможно.

Но ученые выдвигают десятки гипотез – это их работа. Перечислю гипотезы о причине байкальского кризиса:

Научные и ненаучные гипотезы

Отгадки и домыслы

Эвтрофикация прибрежной зоны



Эвтрофикация – это избыточное питание. Конечно, оно есть, это очевидно. Однако, как питание туда попадает, и почему за сотни лет со времен Протопопа Аввакума, 1662* (см. стр. 16) бурного роста спиригиры не было? Это и есть загадка века. Вполне вероятно, что источником питательных веществ является безудержно развившийся дикий туризм

Научные и ненаучные гипотезы

Отгадки и домыслы

Вселение нового вида спиригиры (всего их около 400 по всему миру)



Гипотеза проверяется

Потепление климата

Истончение озонового слоя в тропосфере над Сибирью

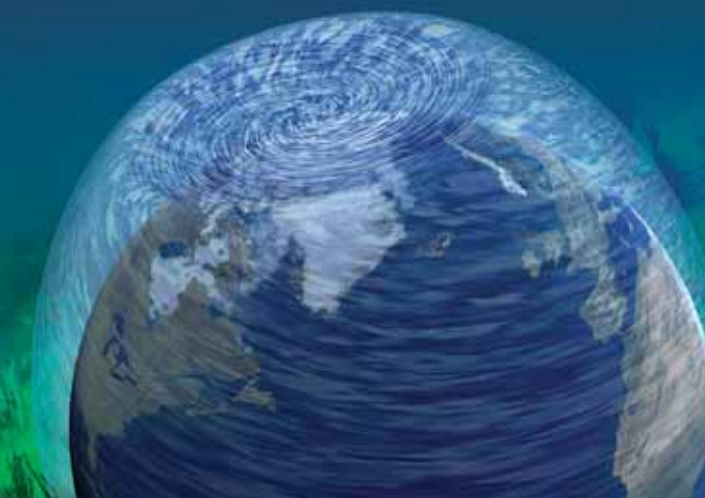
1980



2012



Связь кризиса с потеплением климата не доказана; теплые годы случались и раньше, но к спиригирным кризисам не приводили. К тому же на Байкале максимум развития спиригиры наступает не летом, а в октябре



Фантастика

Научные и ненаучные гипотезы

Отгадки и домыслы

Неконтролируемое размножение байкальского тюленя нерпы



Факт увеличения численности нерпы научно не доказан. Однако нерпа каждый день ест 4 кг рыбы, и масса ее питательных фекалий попадает в мелководье

Возвращение на Байкал огромных стай околородных птиц бакланов, которые сбрасывают свои фекалии на мелководье



Связь не установлена

Научные и ненаучные гипотезы

Отгадки и домыслы

Разрушение слоя газового гидрата на дне Байкала и резкое увеличение концентрации метана в воде, погубившего губки



Губки метана не боятся, это доказано

Снижение уровня Байкала «негодьями»-энергетиками



Энергетики – не негодяи. Подобные понижения уровня случались на Байкале и ранее, но к кризисам не приводили

Спирогира рождается там, где много питания, потом отрывается от лежащих на дне камешков, и в виде плотов перемещается к берегу



Пока для меня эта гипотеза самая правдоподобная



Панорама средней котловины озера Байкал с высоты берегового утеса. Фото В. Короткоручко

* Один из первых восхищенных отзывов о Байкале из русских людей оставил протопоп Аввакум. При возвращении из даурской ссылки неистовому протопопу пришлось летом 1662 года переправляться с восточного берега моря-озера на западный, и он пишет о Байкале:

«...Лодку починя и паруса скропав, через море пошли... Егда к берегу пристали, восстала буря ветренная, и на берегу насили место обрели от волн. Около ево горы высокие, утесы каменные и зело высоки, – двадцать тысяч верст и больши волочился, а не видал таких нигде. Наверху их полатки и повалуши, врата и столпы, ограда каменная и дворы, – все богоделанно. Лук на них растет и чеснок, – больши романовского луковицы и слаток зело. Там же растут и конопли богорасленныя, а во дворах травы красныя и цветны и благовонны гораздо. Птиц зело мно-

го, гусей и лебедей – по морю, яко снег, плавают. Рыба в нем – осетры и таймени, стерледи и омули и сиги и прочих родов много. Вода пресная, а нерпы и зайцы велики в нем: во океане-море большом, живучи на Мезени, таких не видал. А рыбы зело густо в нем: осетры и таймени жирни гораздо, – нельзя жарить на сковороде: жир все будет. А все то у Христа тово-света наделано для человек, чтоб, успокоясь, хвалу Богу воздавал».

«Житие Протопопа Аввакума, им самим написанное» (1662)

Загадка века

Кризис я называю «загадкой века», поскольку, по крайней мере, за 100 последних лет научных наблюдений на Байкале подобной беды не случилось ни разу. И раньше, во времена протопопа Аввакума, подобной выходки спирогиры, вероятно, не было ни разу. Где же загадка? Постоянно проживающие на берегу Байкала жители сбрасывают в озеро ежегодно около 50 т неорганического фосфора. Общее количество неорганического фосфора в Байкале – 308 000 т, т. е. примерно в 6000 раз больше. Значительная часть фосфора к тому же ежегодно утекает с водами Ангары. Ничтожная ежегодная добавка – 1/6000 часть – не могла бы вызвать и не вызвала эвтрофикацию всего озера. Представьте себе, что вам принесли горшок с горохом, но повар ошибся и положил одну лишнюю горошину. Вырастет ли ваш вес?

Зато добавка «горошины» антропогенных питательных веществ в мелководье Байкала действительно могла бы легко вызвать эвтрофикацию прибрежной зоны, если бы она была отделена от открытого Байкала водонепроницаемой стеной, ведь ее объем равен всего пяти кубокилометрам, а объем всего Байкала равен 23 тысячам кубокилометров.

Но стены-то нет. Почему же вода мелководий не обменивается с водой открытого Байкала? Это очень сложная задача из области гидродинамики, для решения которой требуются талантливые физики, математики; не имитационные, а более сложные математические модели; нужны эксперименты во вращающихся опытовых бассейнах, нужны новые натурные наблюдения.

К тому же надо объяснить не только эвтрофикацию мелководной зоны, но и взаимосвязь всех происходящих одновременно кризисных событий: безудержное развитие спирогиры – гибель губок – безудержное развитие ядовитых цианобактерий.

Массовая гибель популяций морских губок наблюдается в мире повсеместно – в Мексиканском заливе, в Карибском море, в Северной Атлантике, в Средиземном море, на Большом Барьерном рифе. Правда, массовая гибель пресноводных губок описана нами впервые. Причину массовой гибели морских губок пытаются установить ведущие биологи многих стран мира, грешат на заражение неизвестными микробами, на глобальное потепление климата, на яды антропогенного происхождения, на возросшее поступление питательных веществ. Работы ведутся, начиная с середины XX века, но к успеху не привели, причины так и остаются неизвестными.

Байкал – гораздо более простая экосистема, чем Мировой океан, и во многом можно было бы разобраться года за три, если бы были деньги. Нельзя работать без реактивов и «расходников», без ремонта приборов, без оплаты аутсорсинга, никто нам в долг не поверит.

Какого-либо специального фонда для разрешения кризисных экологических ситуаций в стране нет, обычного же финансирования не хватает. Естественно, что еще в 2011 г. мы доложили научному сообществу и политическим руководителям всех уровней о кризисе, но деньги от этого не появились.

На принятую в 2012 г. Федеральную целевую программу «Об охране озера Байкал и социально-экономическом развитии Байкальской природной территории» выделено 57 млрд рублей, но ничего не выделено байкальской науке, а нам нужно всего лишь 0,4% от этой суммы, чтобы попытаться понять, что происходит. Без более глубокого понимания трудно надеяться на то, что предлагаемые меры дадут ожидаемый эффект.

На Байкале из 29 сооружений для очистки бытовых стоков поселков и объектов рекреации работает только два, и даже они не обеспечивают предписываемого Законом качества очистки стоков. Нужны не обычные сооружения с биологической очисткой, а специальные установки, в которых доочистка от соединений азота и фосфора производится благодаря специальным технологиям и применению реагентов. Обычное очистное сооружение с биологической очисткой стоков для крупного Байкальского поселка будет стоить 400 млн рублей. Сооружение с дополнительной доочисткой от питательных элементов – азота и фосфора – будет стоить раза в два дороже. А ведь на всем западном побережье Байкала нет не только очистных сооружений, но и системы канализации, без которой эти сооружения бесполезны.

Еще лет 20 назад можно было надеяться, что Байкал справится с человеческими отходами сам. По дороге, ведущий из Иркутска в пос. Листвянка – это самая близкая к Иркутску «визитная карточка» Байкала – пробегало несколько десятков машин, бродили стада коров, и машины уступали им дорогу. По данным ГАИ, в один из дней 2015 г. Листвянку посетило три тысячи автомобилей, и в каждом сидело в среднем по четыре человека. Канализации на большей части территории Листвянки нет, загрязненные стоки из жилых домов и гостиниц с подземными потоками так или иначе попадают в Байкал.

Строительство очистных сооружений и канализации на берегу Байкала потребует много времени и сил.

Однако представим себе на минуту, что наука была не права, не сумев провести достаточно детальных и убедительных исследований. Окажется, что деньги на систему удаления фосфора были потрачены неэффективно. Но очистные сооружения нужно строить, так сегодня требует Закон. Так бывает – политики часто вынуждены принимать решения в условиях недостатка информации, но лучше, чтобы информация была.

Сейчас необходимо разработать и испытать на деле различные системы удаления фосфора из стоков, а в идеале – доказать, что благодаря этому экологический кризис на Байкале может быть остановлен и повернут вспять – это предмет науки.

Известно, что скупой платит дважды. Я уверен в том, что опытно-промышленные установки будут созданы и испытаны, а деньги найдутся. Сегодня отношение к этой проблеме заметно изменилось.

Черный лебедь

Кризис на Байкале стал совершенно неожиданным, и вряд ли его можно было предсказать.



Есть такой знаменитый американский философ, математик, экономист и успешный игрок на бирже, Нассим Николас Талеб. Родился он в Ливане в 1960 г. Знаменитую Гарвардскую школу экономики он называет Советско-гарвардской школой экономики, которая своей главной задачей считает предсказание курсов акций и благополучия государства. Как он говорит, в этой школе есть кафедра орнитологии, где в клетке содержат птиц, а профессора учат птиц летать – машут рукавами, поднимают ногу, опускают нос. Месяца через три птиц отпускают. И, о чудо! Птицы научились, они летят и улетают прочь. Слава прекрасным экономистам! Прекрасная школа!

Талеб ввел понятие «черного лебедя». Наши экономисты, кажется, о нем слышали. «Черный лебедь» – редкое событие большой амплитуды, которое совершенно невозможно предсказать в принципе, даже если есть компьютеры любой мощности. Обычными «советско-гарвардскими» методами нельзя пользоваться для игры на бирже для того, чтобы предсказывать климат или цены на нефть и курс доллара, результат настоящего научного исследования, будущее состояние Байкала – потому что все это – сложные системы, в которых бесконечно малые причины могут рождать бесконечно большие последствия. Талеб извлек выгоду из понимания черного лебедя, его секрет был в том, что встретить «черного лебедя» он всегда был готов, и в результате преуспел.

Не понадеялся он на русский авось. Надеюсь, что и мы сумеем понять и обуздать своего байкальского «черного лебедя».



Литература

- Бормотов А. Е. Что случилось с байкальскими губками? // НАУКА из первых рук, № 5(41), 2011
- Ващенко Б. Чужие на Байкале // National Geographic. 2015. № 146. С. 6.
- Ицкович В. Б., Шугарова А. М., Глызина О. Ю. и др. Изменение содержания БТШ70 у байкальской эндемичной губки *Libotirskia Baicalensis* в процессе обесцвечивания и в условиях гипертермии // Актуальные проблемы науки Прибайкалья: Сборник статей / отв. ред. И. В. Бычков, А. Л. Казаков. Вып. 1. Иркутск: Издательство Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2015. С. 135–138.
- Кравцова Л. С., Ижболдина Л. А., Ханаев И. В. и др. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в открытом Лиственничном заливе озера Байкал, как следствие локального антропогенного воздействия // Докл. РАН. 2012. Т. 447 № 2. С. 227–229.
- Ханаев И. В., Дзюба Е. В., Кравцова Л. С., Грачев М. А. Влияние массового развития зеленых нитчатых водорослей на воспроизводство желтокрылки *Cottocomephorus grewingkii* (Dybowski, 1874) (Cottidae) в условиях экологического кризиса озера Байкал // Докл. РАН. 2016. Т. 467 № 1. С. 119–121.
- Howard B. C. Green Slime Invades World's Deepest Lake // National Geographic, 2015 V. 7. Kravtsova L. S., Izhboldina L. A., Khanaev I. V. et al. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 2014. V. 40. P. 441–448.
- Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamuro M. et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // J. Great Lakes Res. 2016. V. 42. N 3. P. 487–497

Ключевые слова: озеро Байкал, Восточная Сибирь, прибрежная эвтрофикация, спиригира.

Key words: Lake Baikal, East Siberia, coast eutrophication, Spirogyra

В публикации использованы фото:

С. 12 – В. Короткоручко; NASA/Goddard Scientific Visualization Studio; С. 13 – С. Инкена; С. 14 – Министерство природных ресурсов и экологии РФ, «Государственный доклад о состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2014 г.»; В. Глупова, О. Хлыстова, В. Короткоручко, Е. Волковой; С. 18 – черный лебедь, *Cygnus atratus*. Centennial Park, Сидней, Австралия, 9 августа 2008. Фото с [tps://www.flickr.com](https://www.flickr.com)

Загадки байкальской спиругиры

Е. А. ВОЛКОВА

Уже не первый год мировую общественность волнуют сообщения, периодически появляющиеся в печатных и электронных СМИ, о необычном массовом развитии в Байкале загадочной водоросли – спиругиры, «которая губит все на своем пути». И как только не называют, и в чем только не обвиняют несчастную! Действительно, за последние несколько лет во многих районах Байкала выявлено интенсивное зарастание дна спиругирой, а в некоторых – обильные береговые скопления этой водоросли, продукты разложения которых делают прибрежную воду опасной для использования человеком и животными. Раньше водоросли этого рода обитали только в мелководных хорошо прогреваемых бухтах озера и не развивались в таких масштабах. Но ведь не спиругира сама по себе является причиной гибели губок и моллюсков или развития сакситоксин-продуцирующих цианобактерий и других проблем Байкала (Timoshkin et al., 2016). Все эти явления, как звенья одной цепи, – следствие действия факторов, которые, вероятно, имеют смешанную природу. Статья посвящена основным вопросам, которые ставят перед исследователями необычное развитие байкальской спиругиры

В последние годы во многих районах Байкала происходит интенсивное зарастание дна, а в некоторых – серьезные структурные изменения фитобентоса, в частности замена видов-доминантов, в том числе эндемиков, зелеными нитчатыми водорослями, ранее в таких масштабах в озере не регистрируемых. Кроме того, практически по всему периметру озера на глубинах 0–1 м выявлено увеличение биомассы нативных, т.е. характерных для Байкала видов водорослей (Timoshkin et al., 2016). Как правило, значительную долю в составе макрофитобентоса Байкала теперь составляют представители рода спиругиры (*Spirogyra* Link).

Ученым приходилось и прежде наблюдать водоросли рода спиругиры в Байкале и его окрестностях, но никогда за столетнюю историю изучения фитобентоса озера развитие этих водорослей не имело массового характера и было приурочено только к мелководным, хорошо прогреваемым бухтам (Ижболдина, 2007). На данный момент известно, что значительное развитие этих водорослей часто происходит в местах повышенной концентрации биогенных элементов, обусловленной главным образом сбросом недостаточно очищенных сточных вод (Кравцова и др., 2012, Тимошкин и др., 2014). Результатом такого развития являются гниющие массы водорослей, аккумулирующиеся на берегу в некоторых районах озера (например, г. Северобайкальск) в течение всего периода открытой воды (Тимошкин и др., 2014).

Скопления водорослей, выброшенных на берег напротив пос. Максимиха (Багрузинский залив) в октябре 2014 г.

Ключевые слова: Байкал, Великие Американские озера, нитчатые водоросли, спиругиры.

Key words: Baikal, Great Lakes, filamentous algae, Spirogyra

ВОЛКОВА Екатерина Александровна – аспирант лаборатории биологии водных беспозвоночных Лимнологического института СО РАН, Иркутск. Автор и соавтор 6 научных работ

© Е. А. Волкова, 2016



Следует особо отметить, что выбрасываемые на берег водоросли – это нормальное явление в целом. Так завершается вегетационный сезон многих представителей донной флоры озера. Их можно сравнить с фильтром, отработавшим свое, который Байкал регулярно меняет. Например, в последние годы, несмотря на развитие спиригиры, другие нитчатки (нитчатые водоросли) живут и отмирают в положенный им срок. В июне–июле вдоль открытого берега можно видеть скопления улотрикса, а в августе – эндемичных драпарнальдиоидес. Никто их не вытесняет, просто заканчивается пик их вегетации, т. е. роста. На формирование свободноплавающих скоплений талломов макроводорослей в прибрежной части озера в разное время обращали внимание такие исследователи, как В. Ч. Дорогостайский, К. И. Мейер, А. П. Скабичевский.

Однако чрезмерное количество водорослей может быть опасным. А точнее, продукты гниения массивных водорослевых матов, будь то выброшенных на берег или свободноплавающих, могут делать воду непригодной для использования человеком и животными.

Сотрудники лаборатории биологии водных беспозвоночных А. В. Непокрытых и А. Лухнев оценивают ширину водорослевых матов на берегу Байкала. (Пос. Заречное, недалеко от Северобайкальска)

В заливе Лиственничном водорослевые маты спиригиры и улотрикса приводят к существенным нарушениям условий среды для нереста августовской популяции желтокрылки (*Cottocomorphus grewingkii*, Dybowski) (Ханаев и др., 2016)

Для существования байкальских гидробионтов чрезмерное развитие водорослей, по мнению некоторых исследователей, также может создавать серьезные проблемы.

При этом, если «порядочные» улотрикс и драпарнальдиоидес «знают честь» и уходят вовремя, то спиригира упрямо не сдает позиции, поставляя на берег тонны отжившей массы до поздней осени.

Еще в первых работах, посвященных донной флоре Байкала, была отмечена ее оригинальность и наличие специфической зональности в распределении видов. В прибрежной зоне озера выделено пять растительных поясов, занимающих глубины от 0 до 60–116 м и характеризующихся определенными видами водорослей (Ижболдина, 2007).

Начиная с 2012 г. стали появляться научные сообщения о локальных структурных изменениях донных фитоценозов Байкала в связи с чрезмерным развитием нитчатых водорослей. В частности, стало известно о замене в летний период в районе залива Лиственничного эндемичных видов драпарнальдиоидес (*Draparnaldioides* Meyer et Skabitsch.), доминирующих в третьем растительном поясе, нитчатыми водорослями родов спиригира и улотрикс (*Ulothrix* Kütz.), что, по мнению авторов, было связано с повышенной антропогенной нагрузкой, в частности с увеличенным содержанием в воде соединений фосфора, источниками которых могут являться синтетические моющие средства (Кравцова и др., 2012, Kravtsova *et al.*, 2014). Сообщалось также о большом количестве спиригиры, прикрепленной к каменистому субстрату этого

залива в составе первого растительного пояса (на глубине 0,3–0,5 м) (Вишняков и др., 2012). Упомянулось об осеннем развитии на урезе воды в этом же заливе и в бухте Большие Коты зеленой водоросли стигеоклониум (*Stigeoclonium tenue* (Ag.) Kütz.) при практически полном отсутствии обычного для этой зоны пояса

улотрикса. Было показано, что масса спиригиры в период максимального развития в бухте Большие Коты может достигать до 317 г/м² (Тимошкин и др., 2014). По состоянию на 2015 г. спиригира зарегистрирована во многих исследованных районах Байкала, преимущественно вдоль западного берега (Тимошкин и др., 2016).

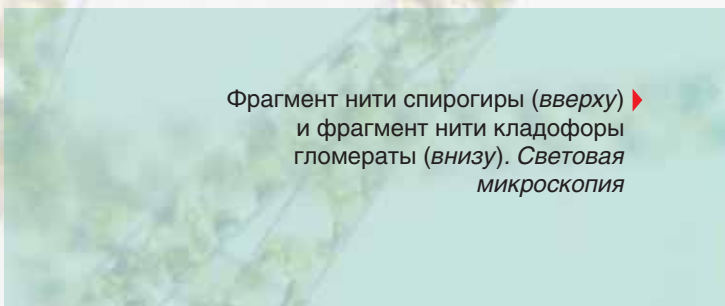


Первый растительный пояс Байкала, или пояс *Ulothrix zonata*, занимающий глубины 0–1,5 м. Фото А. Тимошкина

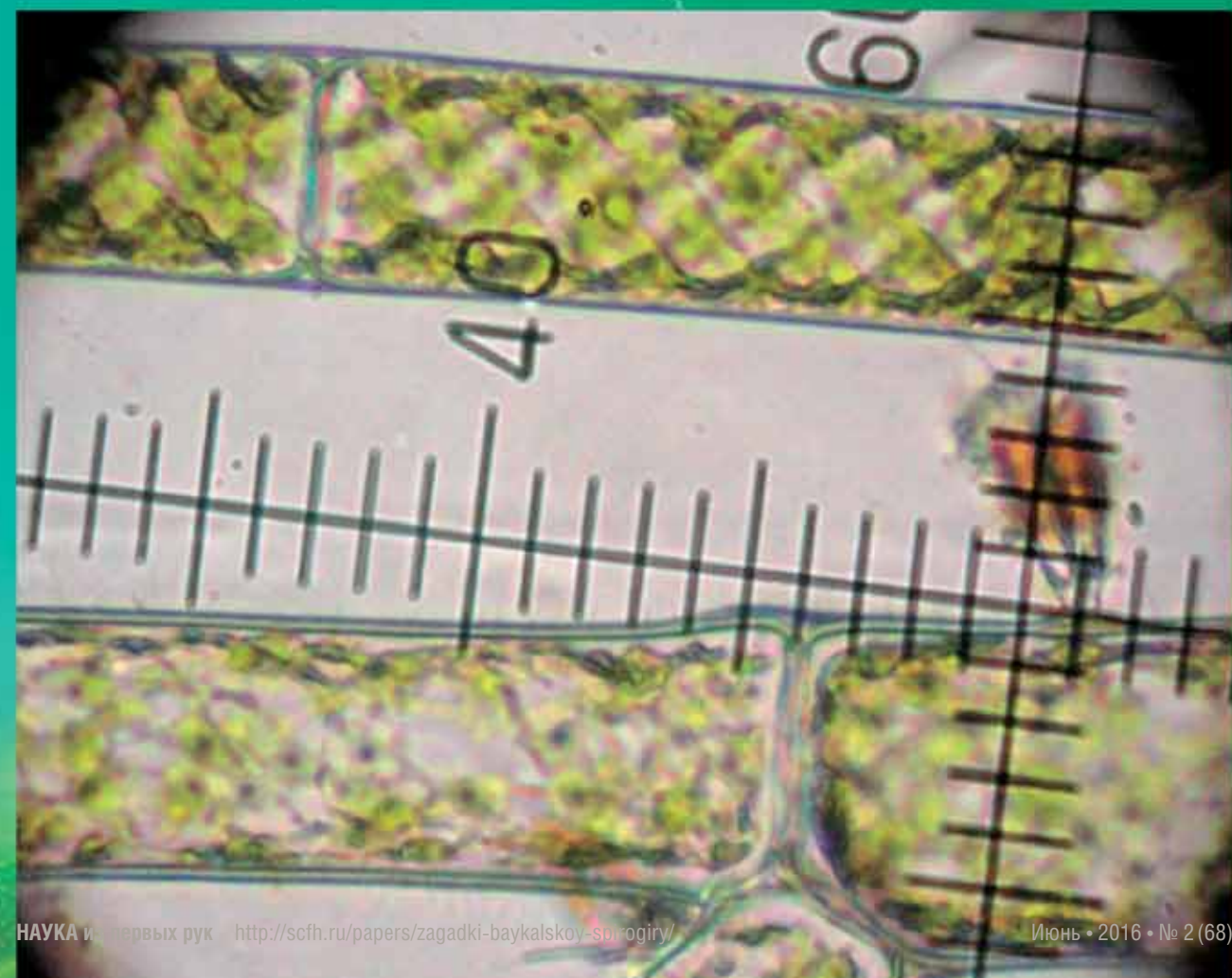
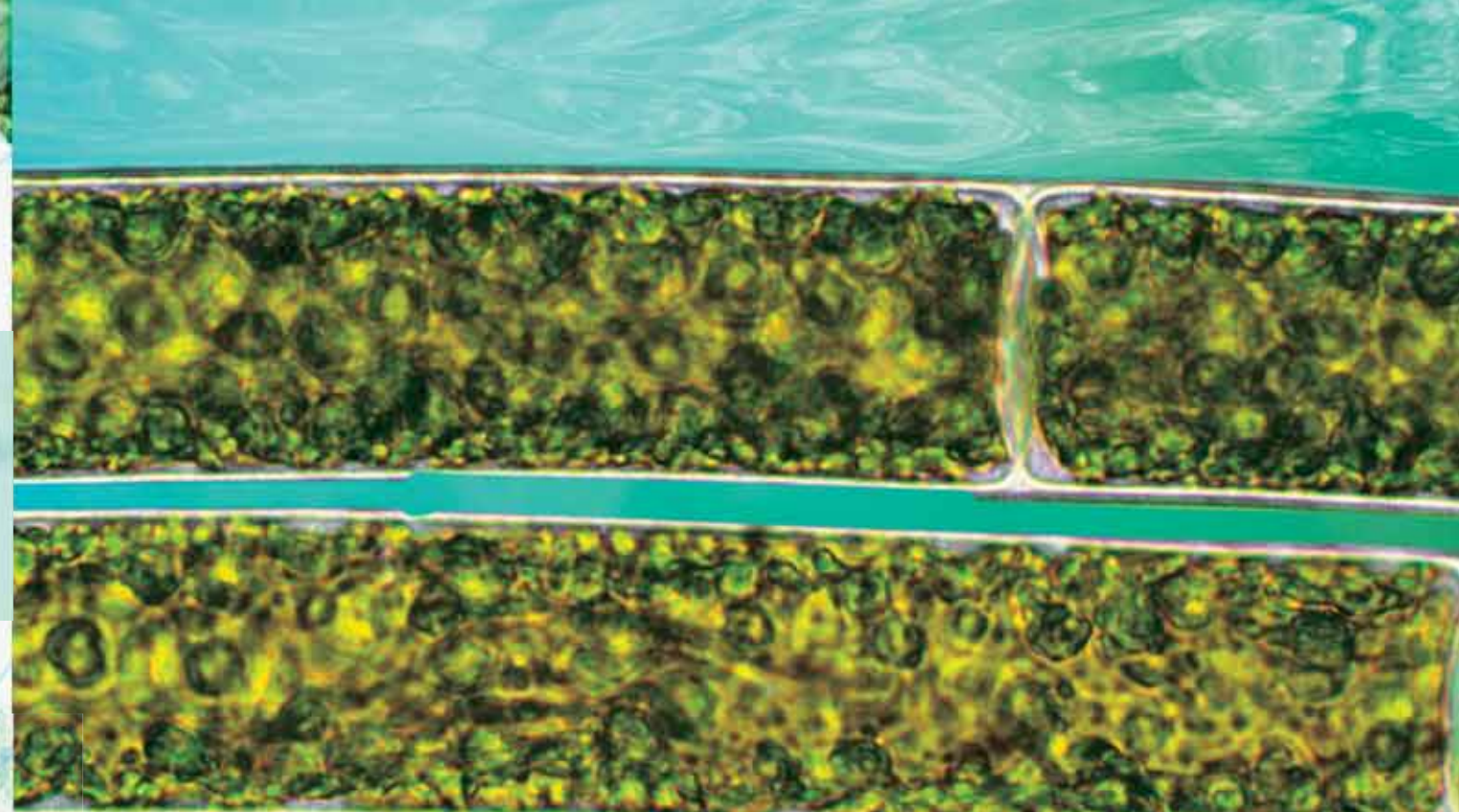
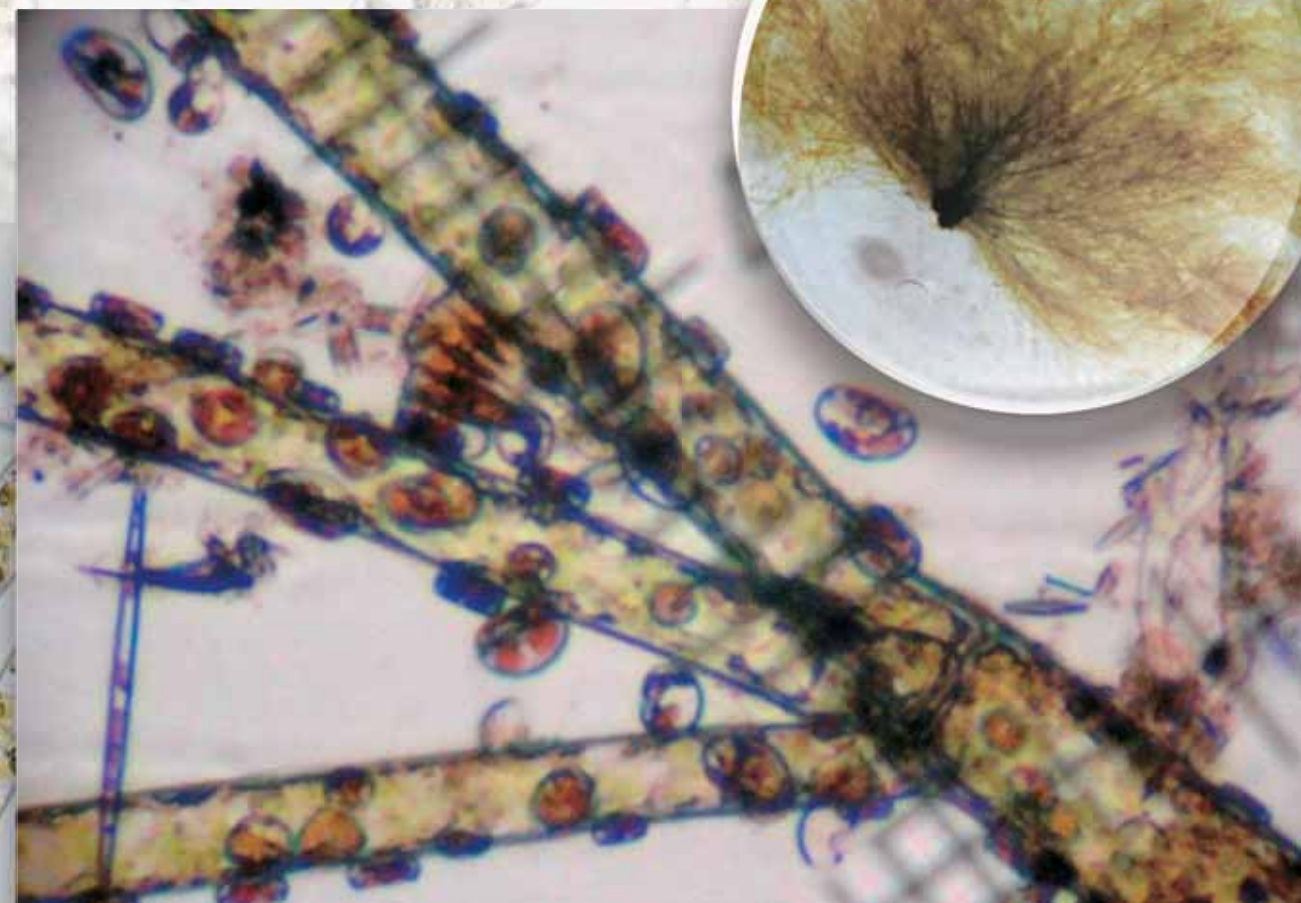
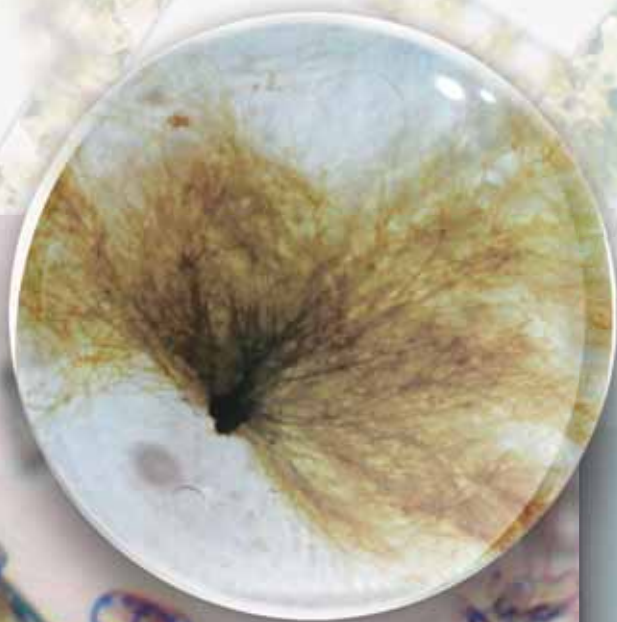
Спиригира, развивающаяся на каменистом мелководье. Байкал, бухта Большое Голоустное, глубина 0,5 м, октябрь 2014 г. Фото О. Тимошкина

Любопытен тот факт, что среди байкальских зеленых водорослей (Chlorophyta), которые являются наиболее разнообразной группой макрофитобентоса озера, лидирующие позиции заняла именно спиругира (которая, однако, согласно современной систематике, относится к отделу Charophyta). В других водоемах, например, в Великих Американских озерах (Эри, Мичиган, Онтарио), увеличение биогенной нагрузки также привело к массовому развитию зеленых нитчаток (Higgins *et al.*, 2008 и др.), однако там, как и во многих других системах, испытывающих подобные проблемы, пришлось иметь дело с кладофорой гломератой (*Cladophora glomerata* (L.) Kütz). Кладофора гломерата, одна из самых широко распространенных нитчаток в мире, также является «естественным» представителем донной флоры Байкала, где встречается на каменистом субстрате в августе-сентябре. При этом вдоль основной части побережья и число участков встречаемости (1,5–8 %) вида, и его фитомасса (0,21г/м²) незначительны (Ижболдина, 2007).

Фрагмент таллома кладофоры гломераты, покрытый диатомовыми водорослями рода кокконеис (*Cocconeis* sp. Ehr). Световая микроскопия. Общий вид таллома кладофоры гломераты (*Cladophora glomerata* L. Kütz).



Фрагмент нити спиругиры (вверху) и фрагмент нити кладофоры гломераты (внизу). Световая микроскопия



Почему спирогира?

Отчего же массовым развитием на биогеогенное перенасыщение литорали Байкала откликнулась именно загадочная спирогира, а, например, не печально известная кладофора гломерата? Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимо изучение этих водорослей, в частности, их жизненных циклов и особенностей развития как в естественной среде обитания на основе регулярных сезонных полевых исследований, так и в лабораторных условиях с учетом многих факторов. Так, например, в случае «цветения» прибрежной зоны Великих Американских озер было выявлено, что резкая замена доминантов – улотрикса зонаты (*Ulothrix zonata* Kütz.) кладофорой гломератой – и чрезмерное развитие последней происходит, в частности, из-за массового бесполого размножения улотрикса, инициируемого повышением температуры воды в летний период (Graham *et al.*, 1985). Опустошенные после выхода зооспор нити улотрикса отмирают, предоставляя «вакантное» место для других водорослей. Далее «на сцену выходит» кладофора гломерата, для которой действующий температурный режим, наличие свободного каменистого субстрата и поступающее биогеогенное «питание» с суши являются благоприятными условиями для успешного развития. Интересно то, что улотрикс возвращается,

когда осенью температура становится ниже 10° С, теперь уже замещая кладофору. То есть особенности биологии отдельных видов в совокупности с абиотическими факторами в условиях повышенной биогеогенной нагрузки во многом ответственны за специфическую перестройку прибрежных донных сообществ в Великих Американских озерах.

Застукать спирогиру со спирогирой

Рассуждая о загадочности развития именно спирогиры в Байкале, нельзя не сказать о ней самой, как об одном из наиболее таинственных представителей растительного мира. Считается, что водоросли рода *Spirogyra* легко узнаваемы благодаря их спирально закрученным хлоропластам. Однако существуют другие, довольно похожие на нее, водоросли (например, рода *Sirogonium* Kütz. или *Sirocladium* Randhawa), которые человек без

Конъюгация спирогиры: переход содержимого из клеток одной нити в клетки другой и формирование зигоспор – продукта полового размножения этих водорослей)

опыта и специальной подготовки может принять за спирогиру. В некоторых случаях ее можно спутать даже с представителями других семейств! Поэтому, видя перед собой зеленый нитчатый моток, нельзя однозначно утверждать, что это спирогира. В некоторых участках Байкала бурно «цветет» только спирогира.

Проблемы идентификации спирогиры связаны еще и с тем, что определение вида проводится по особенностям стадий полового размножения, или конъюгации, когда содержимое клеток одной нити переходит в клетки другой. Без количественных и качественных характеристик этого процесса, без описания сформировавшихся в его результате зигоспор даже примерно нельзя сказать, какой вид находится перед нами на предметном стекле под микроскопом, а значит, и там, откуда был взят образец. При этом такие стадии у спирогиры по разным данным встречаются лишь в 10–18% образцов, а у байкальской спирогиры, по данным автора – лишь в 9%.

С развитием методов молекулярной биологии появилась возможность определять виды живых организмов на основе совпадения нуклеотидных последовательностей молекулярных маркеров неизвестного вида с уже имеющимися в базах данных последовательностями известных видов. На данный момент таксономически признан-

ными являются 516 морфологических видов спирогиры (согласно *AlgaeBase* по состоянию на апрель 2016 г.), однако лишь для 36 из них известны последовательности каких-либо генетических маркеров и только для 8-ми ядерного гена 18S рДНК (согласно базе данных NCBI по состоянию на апрель 2016 г.).

Главным образом именно из-за трудностей видового определения спирогиры сложно сказать, является ли тот или иной вид данного рода вселенцем, который беспрепятственно распространился по всему Байкалу в последние годы. Спирогира, которая сегодня массово развивается во многих районах Байкала, могла быть там и

Анализ последовательностей 18S рДНК, полученных при работе с отдельными вегетативными нитями водорослей из залива Лиственничный, показал, что в массе водорослей присутствуют, как минимум, три вида спирогиры, пока не идентифицированные (Романова и др., 2013)



вчера, но не в таком количестве, а ее фертильные стадии просто не встречались исследователям ранее. Так, недавно по морфологическим признакам была определена *Spirogyra fluviatilis* Helse, или спирогиры речная (Тимошкин, 2014), которая развивается на каменистой литорали в некоторых заливах Байкала. Ранее этот вид в озере не регистрировали, но это не означает, что эта водоросль была занесена недавно. Спирогиры речная широко распространена во всем мире и встречается во многих пресноводных водоемах, реках и озерах. В окрестностях Байкала многие исследователи находили стерильные талломы спирогиры (см. Ижболдина, 2007), вполне возможно, относящиеся и к этому виду.

Вьяснение видового богатства спирогиры в Байкале является на сегодняшний день одной из самых актуальных задач. Во-первых, данные о биоразнообразии вообще и отдельных групп организмов в частности, используются в методах экологического биомониторинга водных экосистем. А точная видовая идентификация и понимание регионального разнообразия является основой биологического контроля и оценки состояния окружающей среды. При этом, сведения о видовом составе спирогиры в Байкале, которыми мы располагаем сегодня, получены более 80 лет назад, ограничены двумя локальными участками (Мейер, 1930) и буквально единичны для окрестностей озера (Ижболдина, 2007). Во-вторых, Байкал – это кладь уникального биологического разнообразия. Многие виды нигде, кроме как в Байкале, не встречаются! Не исключено, что и спирогиры представлена в Байкале многими видами, идентифицировать которые разными методами – задача ближайшего времени.

Работы, которые посвящены фундаментальным и практическим проблемам байкальской спирогиры, ведутся в настоящее время в Лимнологическом институте СО РАН.

Увы, пока вопросов больше, чем ответов. Но, как известно, правильно поставленная задача – уже половина ее решения.

Спирогиры среди камней р. Большая Котинка, впадающей в бухту Большие Коты, и в ручье Жилище (внизу). В центре – камень со дна озера, с глубины одного метра, (около пос. Большое Голоустное), покрытый нитчатыми водорослями, в основном спирогирой, талломы которых достигают 50 см в длину

Выражаю искреннюю благодарность научному руководителю д.б.н., проф. О.А. Тимошкину, а также д.б.н. Н.А. Бондаренко за их чуткое напутствие в моем научном поиске

Литература

Вишняков В. С. и др. Таксономический список макроводорослей прибрежной зоны бухты Большие Коты и залива Лиственничный (Южный Байкал) // Изв. Ирк. гос. ун-та. Сер. «Биология. Экология». 2012. Т. 5, № 3. С. 147–159.

Ижболдина Л. А. Атлас и определитель водорослей фитобентоса и перифритона озера Байкал (мейо- и макрофиты) с краткими очерками по их экологии. Новосибирск: Наука-Центр, 2007. С. 248.

Кравцова Л. С. и др. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в прибрежной части залива Лиственничный озера Байкал. // Докл. РАН. 2012. Т. 447 № 2. С. 1–3.

Романова и др., Идентификация зеленых нитчатых водорослей из района локального биогеогенного загрязнения озера Байкал (залив Лиственничный) с помощью молекулярного маркера 18S рДНК // Экологическая генетика. 2013. Т. 11 № 4. С. 23-33. (12597).

Тимошкин О. А. и др. Экологический кризис на Байкале: ученые ставят диагноз. Наука из первых рук. 2014. Т. 5, С. 75–91.

Тимошкин О. А. и др. Массовое развитие зеленых нитчатых водорослей родов *Spirogyra* Link и *Stigeoclonium* Ktz (*Chlorophyta*) в прибрежной зоне Южного Байкала // Гидробиологический журнал. 2014. Т. 10 № 5. С. 15–26.

Ханаев И. В. и др. Влияние массового развития зеленых нитчатых водорослей на воспроизводство желтокрылки *Cottocomephorus grewingkii* (Dybowski, 1874) (*Cottidae*) в условиях экологического кризиса озера Байкал // Докл. РАН. 2016. Т. 467. № 1. С. 119–121.

Graham J. M. et al. Light and temperature as factors regulating seasonal growth and distribution of *Ulothrix zonata* (*Ulvophyceae*) // J. Phycol. 1985. V. 21. P. 228–234.

Higgins S. N., et al. An ecological review of *Cladophora glomerata* (*Chlorophyta*) in the Laurentian Great Lakes. *Journal of Phycology*. 2008. V. 44. 839–854.

Kravtsova L.S. et al. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal. // *Great Lakes Research*. 2014. V. 40. P. 441–448).

Timoshkin, O. A., et al., Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // *J. Great Lakes Res.* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ «Мой первый грант» № 16-34-00064 «Морфологическое и генетическое разнообразие водорослей рода *Spirogyra* (*Zygnematorhysaeae*, *Chlorophyta*) – новых доминирующих представителей флоры озера Байкал»

Как компьютер «уболтал» СПИРОГИРУ размножаться в неволе

Ю. П. ЗАХАРОВА



Каждому гидробиологу понятно, что для того чтобы выяснить факторы, стимулирующие или угнетающие развитие какого-либо водного организма, помимо полевых наблюдений, полезную информацию можно получить в лабораторных экспериментах. Именно такая задача была «поставлена» спирогирой и академиком М. А. Грачевым перед группой культивирования отдела ультраструктуры клетки Лимнологического института, которой руководит к.б.н. Юлия Захарова.

Спирогира, как все уже знают, обитает в прибрежной зоне, где достаточно света, и вода хорошо перемешивается благодаря волновому движению. Если просто выловить нити этой водоросли и поместить их во флакон для культивирования,

Конъюгация спирогиры в лабораторных условиях – процесс полового размножения водорослей: клетки двух нитей соединяются между собой боковыми выростами, образуя канал, по которому протопласт одной клетки перетекает в другую и сливается с ее содержимым. Клетка, в которой произошло слияние, закругляется, отделяется от нити и, покрываясь толстой оболочкой, превращается в зигоспору
Световая микроскопия



она расти и размножаться не будет. Для этого нужен культиватор, который обеспечивал бы аккуратное и стабильное перемешивание воды под управлением компьютера, задающего режим этого перемешивания, и в который бы помещались планшеты для одновременного получения большого количества точек эксперимента. Такой культиватор М. А. Грачев придумал давно, а теперь молодые сотрудники лаборатории гидрофизики (Константин Кучер и Илья Асламов) его изготовили, в силу срочной необходимости – за пару недель. К сожалению, идею и конструкцию культиватора здесь описать не можем, так как изобретатели собираются его патентовать. Спирогире созданные условия понравились, она в них растет и даже размножается. Один небольшой шаг на пути выяснения причины массового развития этой водоросли в прибрежной зоне озера Байкал сделан. Можно идти дальше...

Ключевые слова: озеро Байкал, культивирование спирогиры.
Key words: Lake Байкал, Spirogyra culture

Руководитель группы культивирования отдела ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН, старший научный сотрудник к.б.н. Юлия Захарова:

«Наша группа культивирования диатомовых водорослей в этом году получила задание выделить монокультуру *Spirogyra*, чтобы получить возможно более полную информацию о росте и развитии спирогиры в различных лабораторных условиях. Раньше мы культивировали диатомовые водоросли в мини-инкубаторах, сконструированных сотрудниками нашего института (Safonova *et al.*, 2007), но для спирогиры была изготовлена новая модель. Мы поместили одиночные нити спирогиры, состоящие из 6—8 клеток, в отдельные лунки пластиковых планшетов. Сначала в качестве среды культивирования использовали стерильную байкальскую воду, но количество клеток в колониях не увеличивалось – спирогира жила, но не росла. Активный рост водоросли нам удалось наблюдать в богатой минеральной среде Болда (Brown *et al.*, 1964). Через два месяца культивирования при естественном освещении при температуре 20—22 С° и постоянном перемешивании, режим которого контролировался компьютером, спирогира начала размножаться»

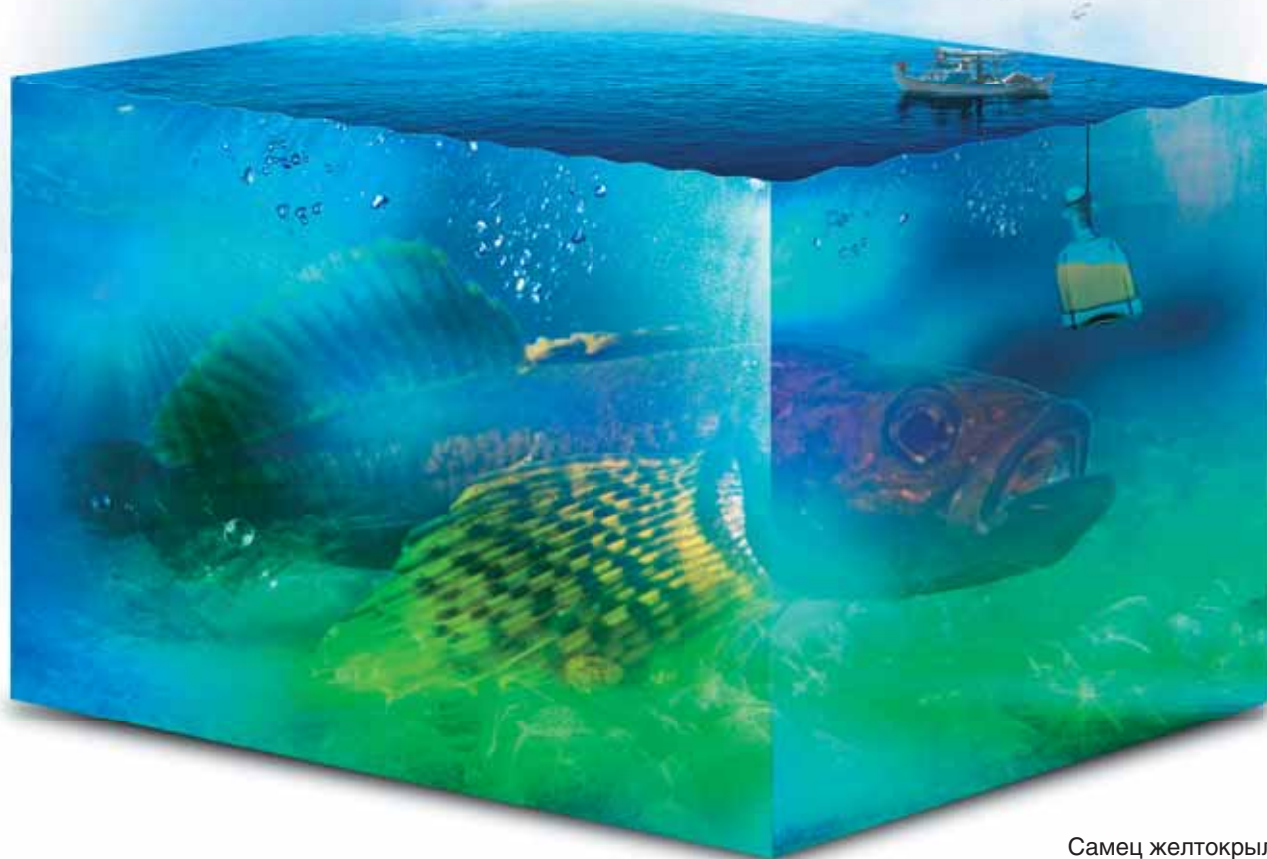
Литература
Brown R. M., Bold H. C. *Phycological studies. 5. Comparative studies of the algal genera Tetracystis and Chlorococcum* // Univ. Texas Publ. 1964. N 6417. P. 1–213.
Safonova T. A., Aslamov I. A., Basharina T. N., *et al.* *Cultivation and automatic counting of diatom algae cells in multi-well plastic plates* // *Diatom Res.* 2007. V. 22 (1). P. 189–195

© Ю. П. Захарова, 2016

И. В. КЛИМЕНКОВ

ОТ ОБОНЯНИЯ РЫБ К ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ МЕДИЦИНЕ

Нейробиологи, описывая способность нервных клеток к адаптации, используют уже укоренившееся в биологической литературе понятие «нейропластичность». Этот термин вовсе не означает, что нейроны способны изменяться как пластилин, перестраиваться они могут, но в определенных структурно-функциональных «рамках», за пределами которых клетка гибнет. Изучая нейропластичность, исследователи, с одной стороны, разгадывают загадки природы, а с другой – пытаются использовать это явление для решения человеческих, медицинских задач.



Самец желтокрылой широколобки (*C. grewingkii*) в брачном «наряде»

Ключевые слова: обоняние, запах, хеморецепторы, рецепторные белки, дендрит, нейросекреция, дендритная нейросекреция, желтокрылая широколобка, рыбы, Байкал.
Key words: olfaction, odor, chemoreceptors, receptor proteins, dendrite, neurosecretion, dendritic neurosecretion, yellowfin Baikal sculpin, fish, Baikal

© И. В. Клименков, 2016

Обоняние – древнейший орган чувств. Чувствительные к химическим веществам хеморецепторные клетки, с помощью которых мы чувствуем запахи, представляют собой биполярные нейроны. Это нервные клетки, имеющие, как и многие нейроны, один аксон – длинный отросток, направляющийся в мозг, и один дендрит – короткий отросток. Дендрит хеморецепторных клеток выступает во внешнюю среду своими чувствительными элементами – ресничками (жгутиками), в мембранах которых расположены мембраносвязанные рецепторные белки.

У многих животных хеморецепторные клетки достигли в процессе эволюции высочайшей специализации, фактически, физического предела «разрешающей способности» обонятельного аппарата и способны безошибочно идентифицировать отдельные молекулы и посылать информацию в мозг. Особенно важны химические сигналы, которые определяют пищевое, оборонительное и репродуктивное поведение, а недавно обнаружилось, что с помощью обоняния оцениваются и более «тонкие» биологические характеристики: социальный статус, физиологическое состояние и другие «персонифицированные» данные особей своего или чужого вида.

Но как эти нервные клетки приобретают такую высокую специализацию в процессе индивидуального развития? Каковы ресурсы надежности их работы? Эти вопросы важны не только для изучения сложного поведения животных, но и для решения некоторых медицинских задач, таких как борьба с болезнью Альцгеймера и проблемы трансплантологии.

Желтокрылые широколобки – половое поведение определяется запахом

Феномен нейропластичности предполагает как функциональные изменения клеток, так и структурные, которые можно увидеть под электронным микроскопом. Чтобы определить четкие морфологические, ультраструктурные критерии высокой или низкой чувствительности рецепторных клеток, нужна хорошая модель. Она была найдена при изучении хемокоммуникативного поведения одного из видов байкальских рыб – желтокрылых широколобок (*Cottocomephorus grewingkii*).

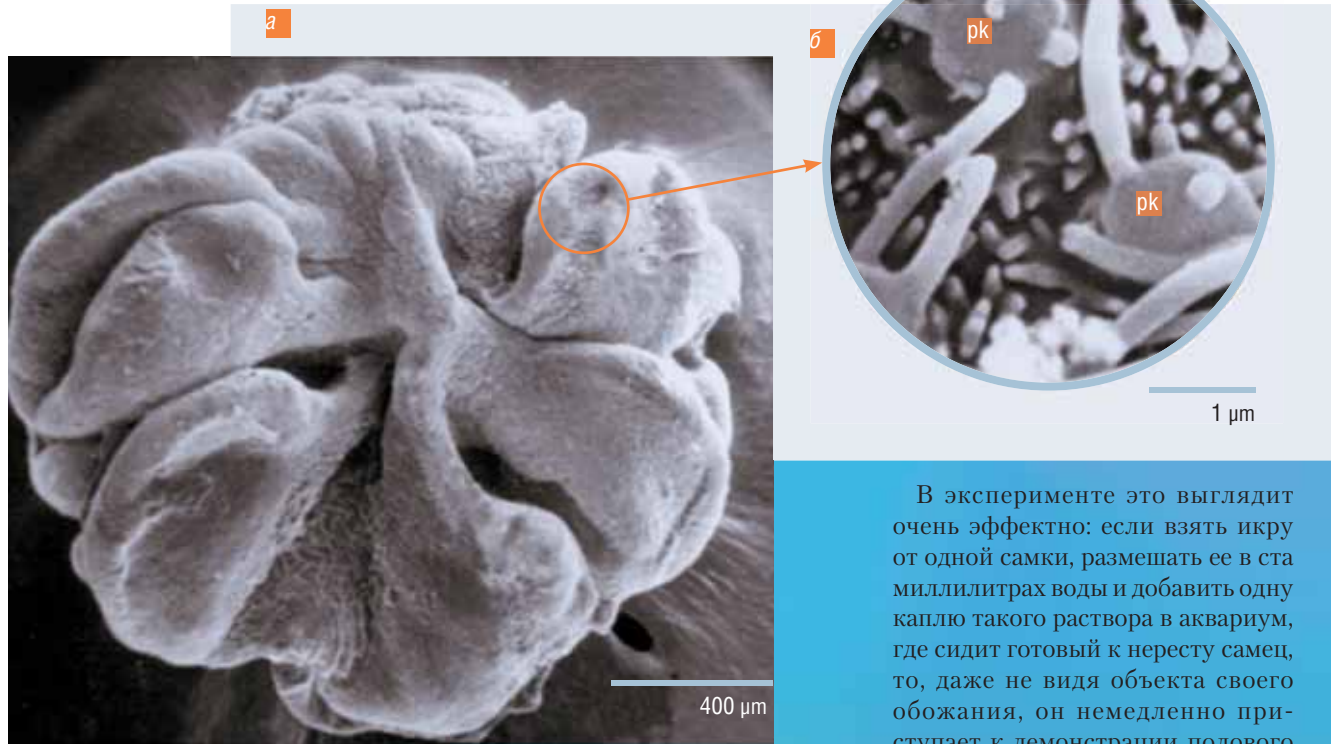
Оказалось, что при переходе к нересту самцы этих рыб приобретают очень высокую чувствительность к половому феромону самки. В яичнике самки зрелые икринки находятся в полостной (овариальной) жидкости, которая относительно долгое время поддерживает их в состоянии, готовом к оплодотворению. Овариальная жидкость богата биологически активными соединениями, которые называют феромонами – веществами, вызывающими определенные нейроэндокринные и поведенческие реакции у животного того же вида, что и особь, которая их выделяет.

Феромоны не только привлекают самца желтокрылых широколобок к самке, но и синхронизируют (с самкой!) созревание его половых продуктов. Более детальные исследования показали, что один из ключевых компонентов феромона самки – стероид 17-дигидроксипрогестерон, действует в очень низкой концентрации – всего 10^{-11} – 10^{-13} М.



КЛИМЕНКОВ Игорь Викторович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН (Иркутск), доцент Иркутского государственного университета. Автор и соавтор 60 научных работ

По материалам совместных исследований с к.б.н. Н.П. Судаковым (Иркутский научный центр хирургии и травматологии, Иркутский научный центр СО РАН, Иркутский государственный университет), н.с. А.В. Курьлевым (Иркутский государственный университет, Иркутск), к.б.н. М.В. Пастуховым (Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск) и д.б.н., проф. Н.П. Косицыным (Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва).



В отличие от человека, у рыб обонятельные клетки локализованы в специальном, похожем на цветок органе – обонятельной «розетке», собранной из 5–6 отдельных лепестков. На фото – обонятельная «розетка» желтокрылой широколобки (*C. grewingkii*); а – общий вид, б – увеличенный фрагмент эпителия с вершинами рецепторных клеток (pk) жгутикового типа. Электронная микроскопия

В эксперименте это выглядит очень эффектно: если взять икру от одной самки, размещать ее в ста миллилитрах воды и добавить одну каплю такого раствора в аквариум, где сидит готовый к нересту самец, то, даже не видя объекта своего обожания, он немедленно приступает к демонстрации полового поведения. Ведомый запахом, самец переворачивается и начинает мелко вибрировать телом, «вхолостую» выделяя половые продукты. Самки тоже активно реагируют на феромоны самца, которые он выделяет в воду с мочой.

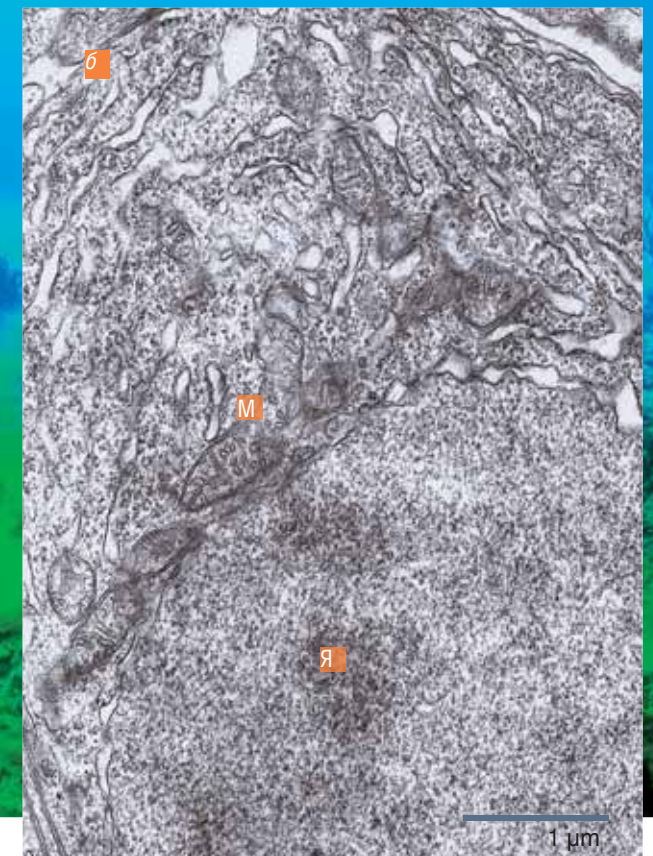
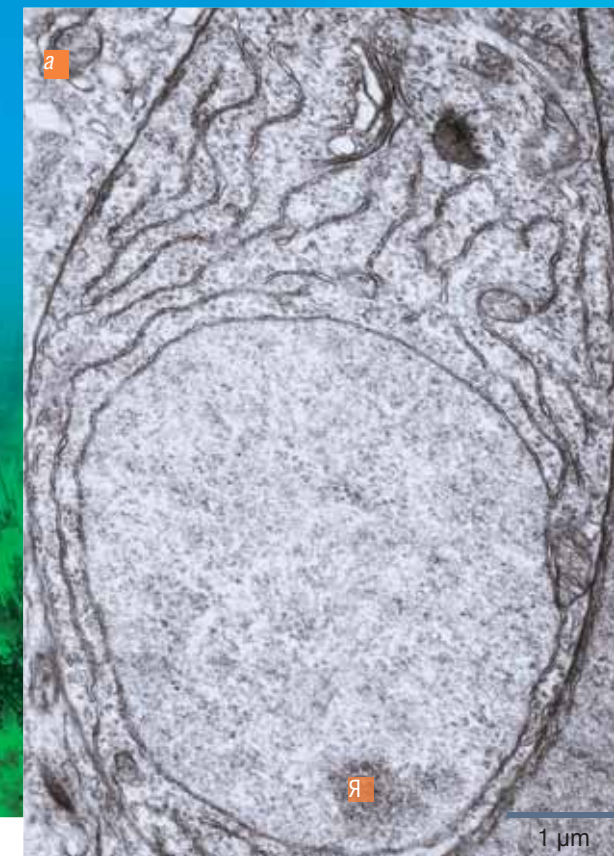
То есть, достаточно совсем небольшой порции биологически значимых молекул, чтобы радикально изменить поведение рыбы. Характерно, что в этот период желтокрылки приобретают хорошо выраженный половой диморфизм. Голова самца становится угольно черной, а плавники – лимонно-желтыми: такая окраска помогает понравиться самкам и позволяет выдерживать жесткую конкуренцию

Рецепторные клетки (pk) желтокрылой широколобки в период нереста, в фазу дендритной нейросекреции. Реснички (отмечены стрелками) локализируются внутри дендритов. Видны многочисленные везикулы (V), которые транспортируются к вершине клетки, где встраиваются в мембрану, выделяя содержимое в обонятельную слизь

со стороны других претендентов на нее. Самки в этом отношении менее привлекательны – они, как это характерно для большинства видов рыб, во время нереста практически не изменяют окраску, т. е., для самца окраска полового партнера не имеет принципиального значения. Зато химические сигналы, исходящие от готовой к нересту самки, имеют первостепенную важность.

Таким образом, в репродуктивный период обонятельные клетки самцов желтокрылых широколобок каким-то образом перенастраиваются с восприятия пищевых сигналов, характерных для межнерестового сезона, на феромональные, без которых эти рыбы не могут размножаться.

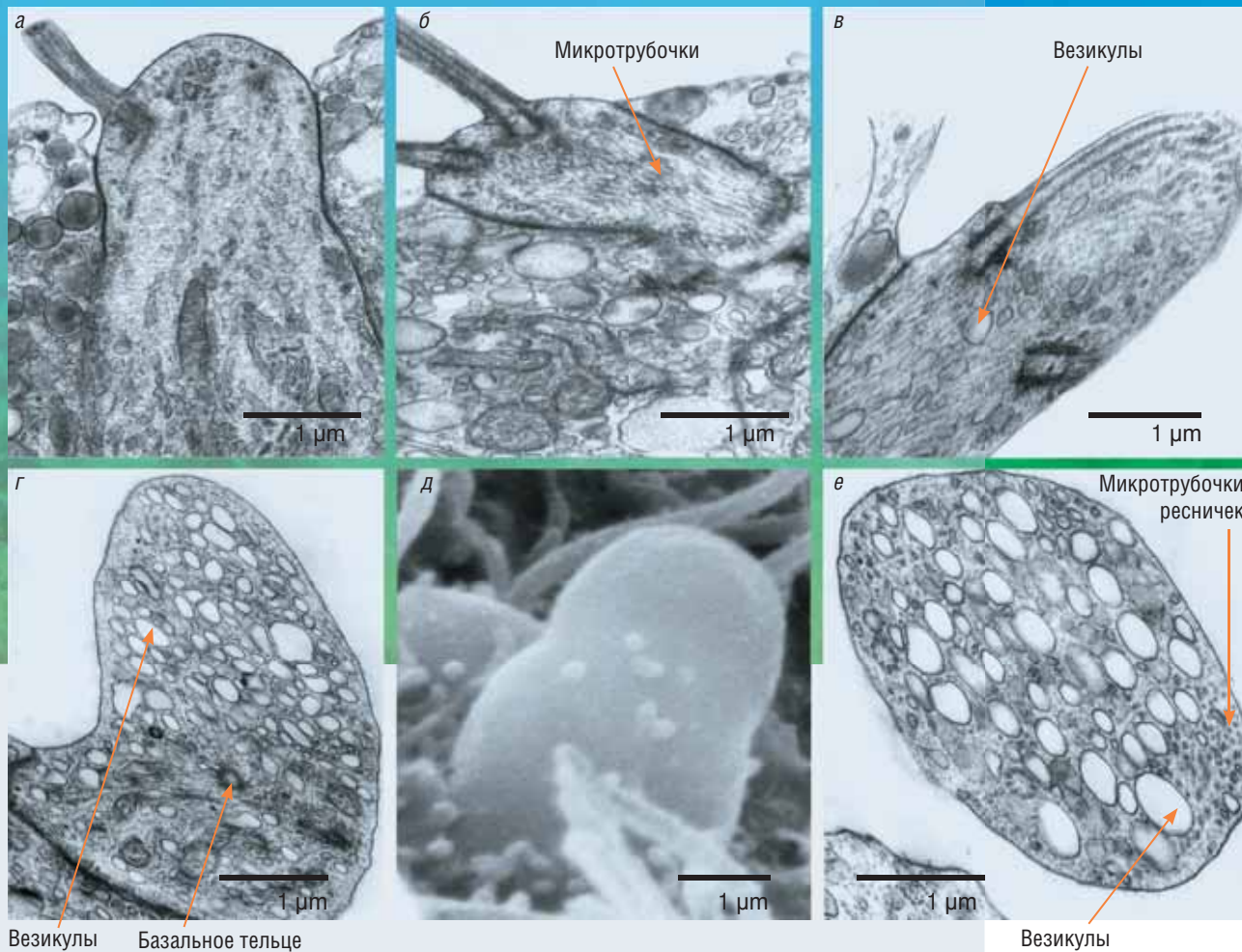
вблизи которых сосредотачиваются «энергетические станции» – митохондрии. Вследствие этого в цитоплазме возрастает и плотность рибосом – «молекулярных машин» для синтеза белка. В дендритах хеморецепторных клеток наблюдаются четко структурированные микротрубочки – элементы цитоскелета, транспортная система нейрона. Это важно, поскольку адаптивные изменения клеток должны сказываться на потребности в соответствующих ферментных системах, которые экстренно доставляются по микротрубочкам из тела клетки к рецептивному участку. Таким образом, мы обнаружили морфологические показатели, сопровожда-



Из обонятельных – в секреторные

Когда хеморецепторные клетки желтокрылых широколобок становятся чувствительными к феромонам, в них появляются ультраструктурные признаки возросшего метаболизма. Наблюдается усиление ядерно-цитоплазматических взаимодействий: активируется ядрышко, в ядерной мембране увеличивается плотность пор,

В сравнении с межнерестовым периодом (а) в репродуктивную фазу в обонятельных нейронах желтокрылой широколобки наблюдается активация ядерно-цитоплазматических взаимодействий (б). Я – ядрышко, где происходит синтез рибосом, обближено с ядерной мембраной, которая приобретает повышенную плотность пор; М – митохондрии вплотную примыкают к ядерной мембране



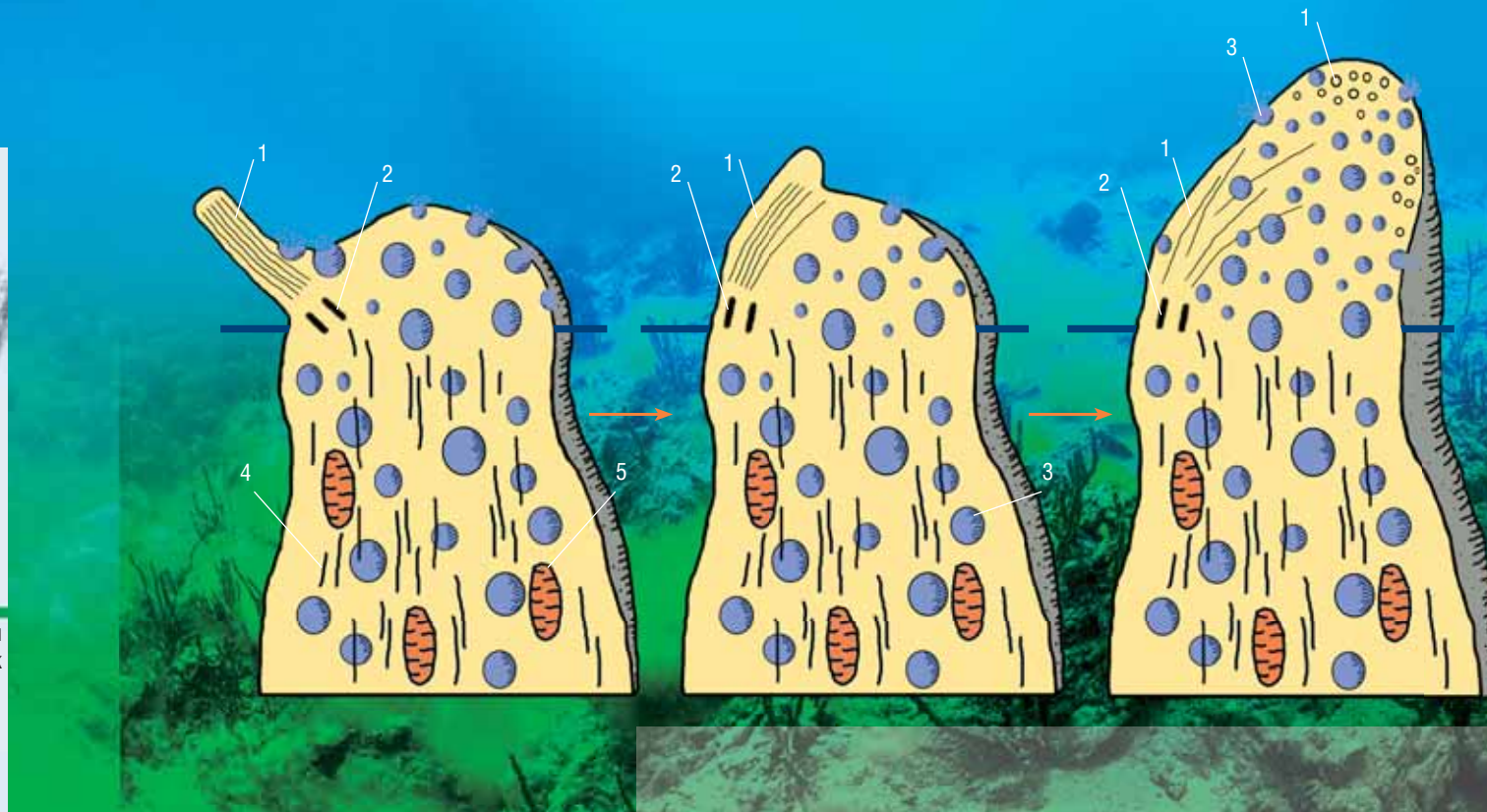
ющие настройку обонятельных клеток на восприятие предельно низких концентраций химических агентов. Надо признать, что эти структурные перестройки принципиально не отличаются от таковых у других нейронов центральной нервной системы, когда они находятся в режиме активной работы. Их обычно называют «реактивными свойствами нейрона», который при оптимальной функциональной нагрузке демонстрирует структурные признаки «напряжения» – адаптации к действующему раздражителю.

Но другие изменения оказались нетипичными для чувствительных клеток. При переходе самцов желтокрылок к родительскому поведению – охране икры – в некоторых рецепторных клетках на фоне усиленного белкового синтеза активизировался аппарат Гольджи – это система внутриклеточных мембранных структур, в которых созревают и накапливаются различные вещества, а затем транспортируются «по месту назначения». В клетках хорошо выявлялся направленный транспорт секреторных везикул к вершине клетки, где они встраивались в мембрану, выделяя содержимое в обонятельную слизь.

Ультраструктурные перестройки вершин рецепторных клеток желтокрылой широколобки в разные фазы жизненного цикла и репродуктивного поведения:

- а* – межнерестовый период, клетка функционирует как обычная хеморецепторная клетка, воспринимающая пищевые сигналы;
- б* – нерест, клетка перенастраивается на восприятие феромонов, при этом появляется упорядоченная система микротрубочек;
- в* – ресничка погружена внутрь дендрита;
- г* – вершина клетки в фазу дендритной нейросекреции. Базальное тельце – структура, от которой отходит ресничка, здесь оно прикрито большим количеством секреторных пузырьков;
- д* – так выглядит вершина клетки без жгутиков;
- е* – дезагрегация микротрубочек, погруженных внутрь клетки в процессе ее гибели после активного секреторного процесса.

Электронная микроскопия



В процессе описанной трансформации хеморецепторные клетки теряют свой поверхностный рецепторный аппарат – чувствительные реснички. Их опорный цитоскелет погружается в вершину дендрита, и у клетки, по-видимому, исчезает способность к хеморецепции. То есть, клетки перестают быть обонятельными – вместо этого они становятся секреторными!

В традиционные представления о функциональном предназначении обонятельных нейронов это не вписывается. Начиная с самых ранних работ (Schultze *et al.*, 1856) и до настоящего времени считается общепризнанным положение о том, что вершина хеморецепторной клетки всегда специализирована *только* для обеспечения хеморецепции. Кроме того, хорошо известно, что нейросекреция в любой нервной клетке, за некоторым исключением, осуществляется через аксон, который и передает информацию другой клетке, а не через дендрит.

Правда в ряде работ описывались отдельные элементы морфологических изменений, которые, судя

Схематическое изображение последовательных этапов структурной реорганизации вершины хеморецепторной клетки желтокрылой широколобки при ее переключении на режим дендритной нейросекреции: 1 – микротрубочки ресничек; 2 – базальные тельца; 3 – секреторные пузырьки; 4 – микротрубочки дендрита; 5 – митохондрии

ПОДОБНЫЕ ИММУННЫМ

Интересно, что динамика изменений, происходящих с хеморецепторными клетками под действием одорантного раздражителя, очень похожа на динамику изменений В-лимфоцитов иммунной системы в процессе их ответа на иммунный стимул. Это совсем не удивительно, поскольку и иммунная, и обонятельная системы решают одну и ту же задачу, связанную с распознаванием чужеродных молекул – антигенов.

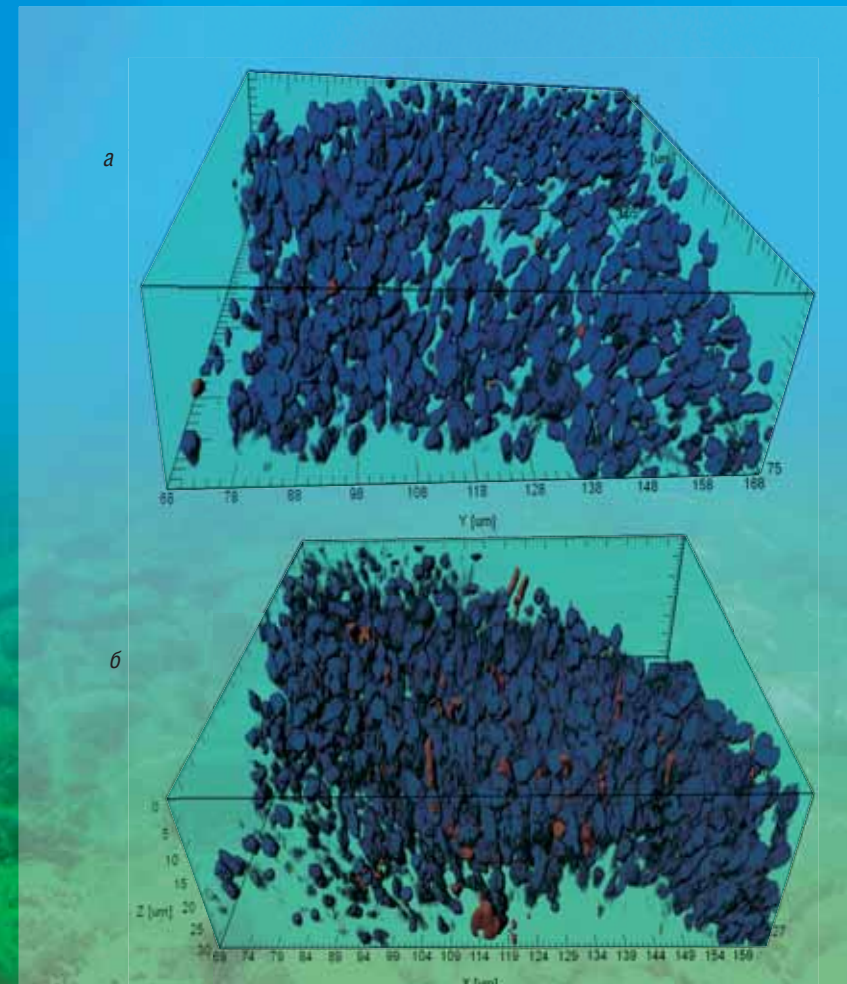
О возможности существования иммунных принципов функционирования обонятельных клеток свидетельствует ряд важных свойств. Как и лимфоциты, обонятельные клетки моноспецифичны и имеют большое разнообразие (полиморфизм) генов, кодирующих одорант-связывающие рецепторы (Buck, Axel, 1991). К этому можно добавить еще два важных факта, полученных совсем недавно. Анализ генома человека показал, что промоторы (место начала синтеза цепи РНК) контролирующие экспрессию генов обонятельных рецепторов и белков главного комплекса гистосовместимости, также обладают очень высоким точечным полиморфизмом (Игнатъева и др., 2014). И еще одно неожиданное обстоятельство, которое говорит о пока малоизвестном эволюционном параллелизме обонятельной и иммунной систем: в прошлом году немецкие ученые обнаружили обонятельные и вкусовые рецепторы в мембранах иммунных клеток (Malki *et al.*, 2015).

В сравнении с донерестовым периодом (а), у желтокрылой широколобки во время репродукции существенно усилена дыхательная активность митохондрий (б). Окраска на ядерный материал (DAPI, синий) и митохондрии (MitoTracker® Orange); 3D-реконструкции; конфокальная микроскопия

Мы предположили, что протестимულიрованные хеморецепторные нейроны начинают производить не мембраносвязанную, а водорастворимую форму белков (Klimenkov *et al.*, 2014), которые связывают молекулы одоранта непосредственно в обонятельной слизи, обеспечивая адаптивную потерю обоняния – если рыба долго находится под воздействием запаха, она перестает его чувствовать.

Несмотря на привлекательность этой гипотезы, остается неясным, могут ли клетки переключаться с синтеза мембраносвязанной формы рецепторных белков на синтез секреторируемой формы с сохранением их специфичности, так как пока не известны механизмы, позволяющие собирать водорастворимую форму рецепторов. Возможно, в процессе дендритной нейросекреции нейроны переключаются на синтез каких-то других белков или коротких нейропептидов. Такая трактовка дает почву для развития «олигогенной» гипотезы кодирования рецепторных белков, согласно которой обонятельные клетки на разных этапах своего развития могут экспрессировать не один, а несколько генов, кодирующих рецепторы к одорантам (Mombaerts, 2004).

Нужно отметить, что морфологически обонятельные клетки с дендритной нейросекрецией сходны с нейросекреторными клетками гипоталамуса, которые «профессионально» синтезируют и выделяют вещества различной химической природы, участвующие



по всему, говорят о реорганизации обонятельных клеток в режим дендритной нейросекреции. Ключевые элементы таких перестроек – пузырьки со светлым содержимым в разных количествах – встречались в дендритах и вершинах рецепторных клеток у многих животных и даже у человека. Но в этих исследованиях не обнаруживалось существенного увеличения секреторной функции аппарата Гольджи, которое бы сопровождалось значительными перестройками вершины клетки. Поэтому обнаруженные в обонятельных клетках пузырьки до сих пор, к сожалению, не привлекали к себе большого внимания.

Не только во время нереста

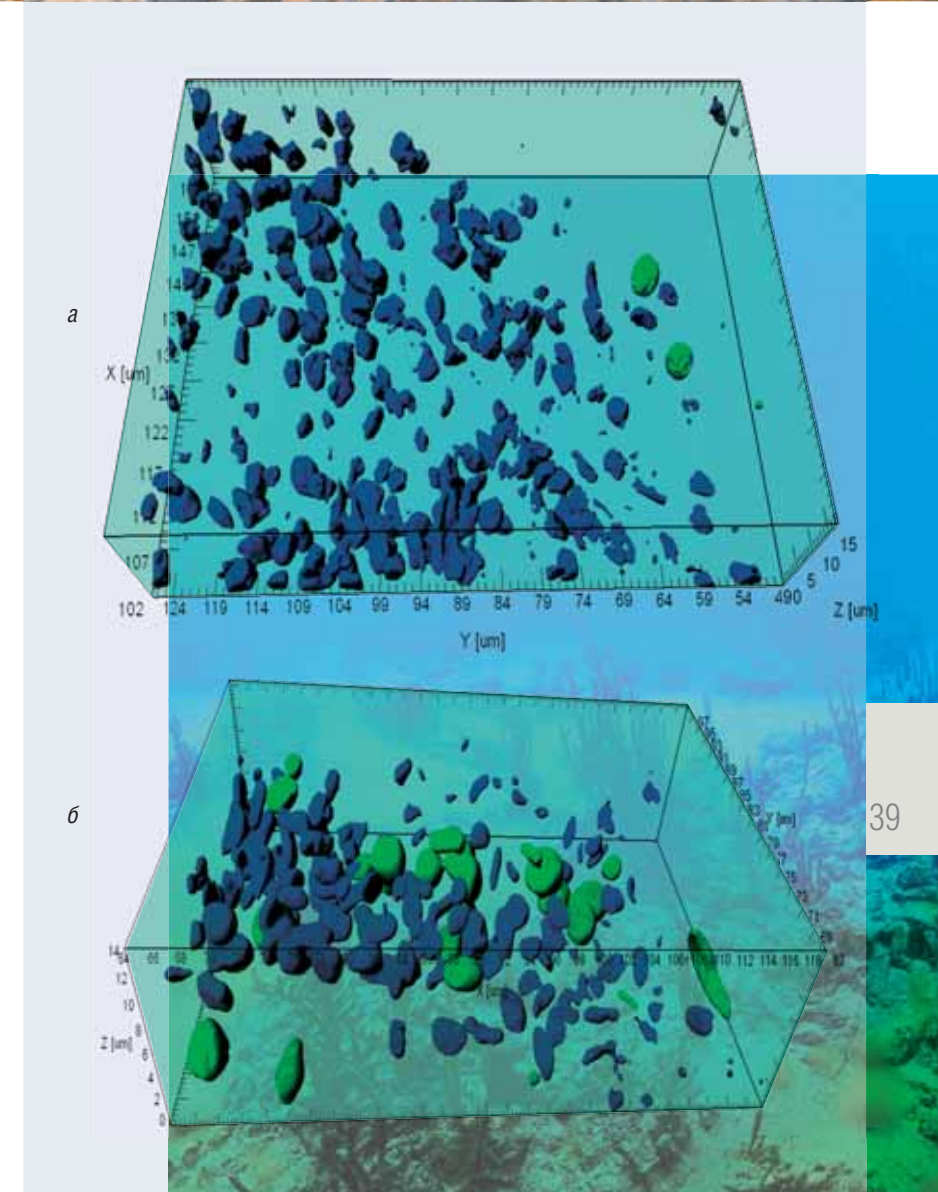
Дендритная нейросекреция происходит у рыб не только в нерестовый период. Сходные ультраструктурные перестройки обонятельных клеток наблюдаются, если рыбу подвергнуть длительному одорантному воздействию (воздействию запахом) нетоксичных водорастворимых веществ – мы использовали смесь аминокислот и пептидов.

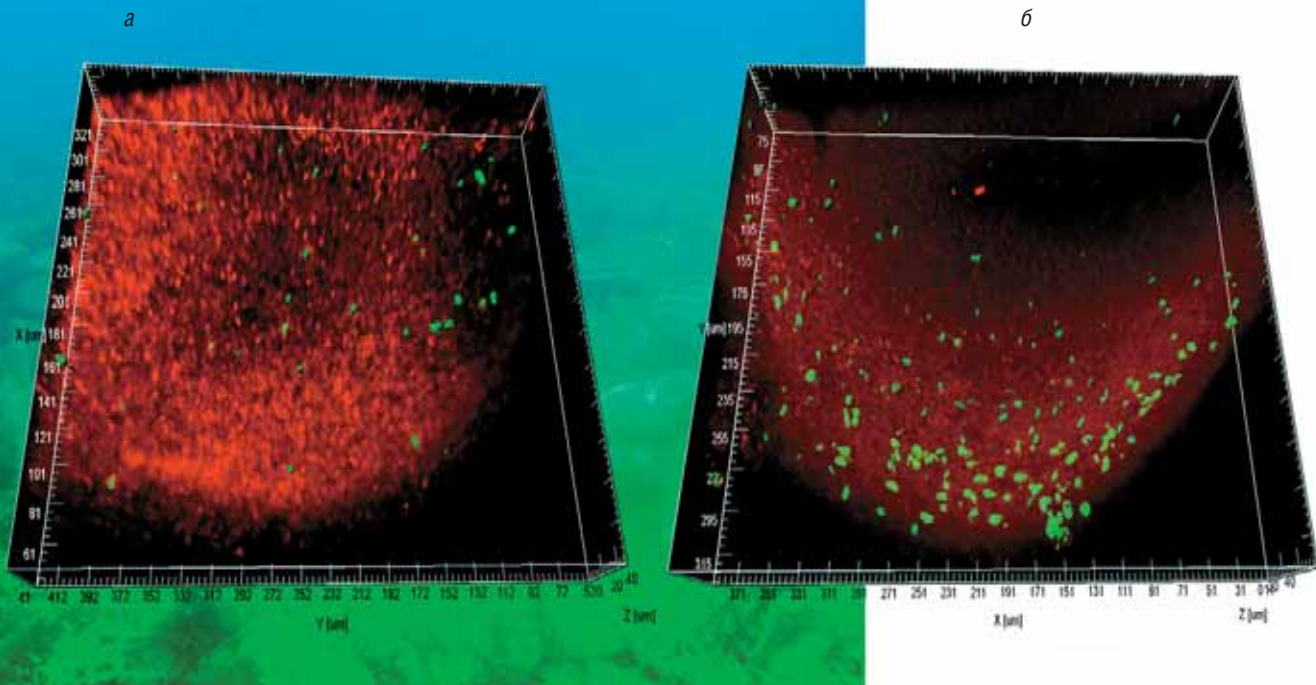


Большая широколобка (*Procottus major* Taliev, 1949)

В сравнении с контролем (а), после продолжительной хемостимуляции гетерогенной смесью аминокислот и пептидов в обонятельном эпителии у жемчужного гурами (*T. leeri*) наблюдается усиление процессов программируемой клеточной гибели (б). Метод Click-IT® TUNEL; ядра погибших клеток окрашены Alexa Fluor (зеленый); жизнеспособные – Hoechst (синий); конфокальная микроскопия; 3D-реконструкции

щие в обработке информации и в обеспечении нейропластичности. Наряду с аминокислотами и моноаминами сейчас в качестве таких веществ признаются нейропептиды, выделяемые как аксонами, так и дендритами нервных клеток (Leng, Ludwig, 2008). Нейропептиды могут действовать не только в области синапсов. Период полураспада у них продолжительный, они диффундируют в межклеточное пространство и могут влиять на более удаленные мишени (Son *et al.*, 2013). Поэтому, кроме быстродействующих нейромедиаторов, нейропептиды рассматриваются как одно из важных средств химической коммуникации в мозге. Так что феномен дендритной нейросекреции, характерный для некоторых типов клеток центральной нерв-





ной системы, вероятно, не является экстраординарным свойством и для обонятельных нейронов.

Компенсаторный нейрогенез и медицина

В процессе экспериментов выяснилось, что в ходе длительного воздействия запахом часть обонятельных клеток претерпевает нейродегенеративные изменения и погибает. Перед этим в таких клетках страдают митохондрии, усиливается образование свободных радикалов, что бывает при развитии патологических процессов. Приходится делать парадоксальный вывод: даже совершенно безобидные пахучие вещества, действующие в избытке, воздействуют на клетку как фактор стресса.

Мы предположили, что в таких условиях в чувствительном эпителии должны развиваться компенсаторные процессы нейрогенеза. И действительно, у экспериментальных рыб интенсивность пролиферативной активности была в 2,6 раза выше, чем в контрольной группе. То есть, образование новых клеток в сенсорном аппарате животных может активироваться не только после перерезки обонятельного нерва, механических или острых токсических воздействий, как это предполагалось, но и в ходе усиленной стимуляции запахом и последующих дегенеративных изменений.

Это явление очень важно с практической точки зрения. Сейчас остро стоит вопрос об источниках малодифференцированных нейтральных клеток, которые можно было бы культивировать и использовать как биологический «клей» для лечения травматических

Отдельные складки обонятельного эпителия у каменной широколобки (*Paracottus knerii*) в контроле (а) и после продолжительного воздействия гетерогенной смесью аминокислот и пептидов (б). Избирательная окраска ядер митотически активных клеток с помощью антител, меченых FITC к бромдезоксипуридину (зеленый). Неделющиеся ядра клеток окрашены 7-аминоактиномицином (красный); конфокальная микроскопия; 3D-реконструкции

повреждений нервной системы. Важнейшее требование к такому «клею» – генетическая совместимость с клетками человека, который нуждается в помощи. Решение задачи сопряжено со многими трудностями, включая проблемы этического характера. Возможно, байкальские широколобки смогут дать интересный материал не только в плане познания их биологии и механизмов приспособления к действию химических факторов среды, но и в плане использования полученных знаний для решения некоторых проблем восстановительной медицины. Обонятельный эпителий – единственный доступный источник аутологических малодифференцированных нейтральных клеток, которые можно использовать для трансплантации, для лечения заболеваний нервной системы (Викторов, 2006).

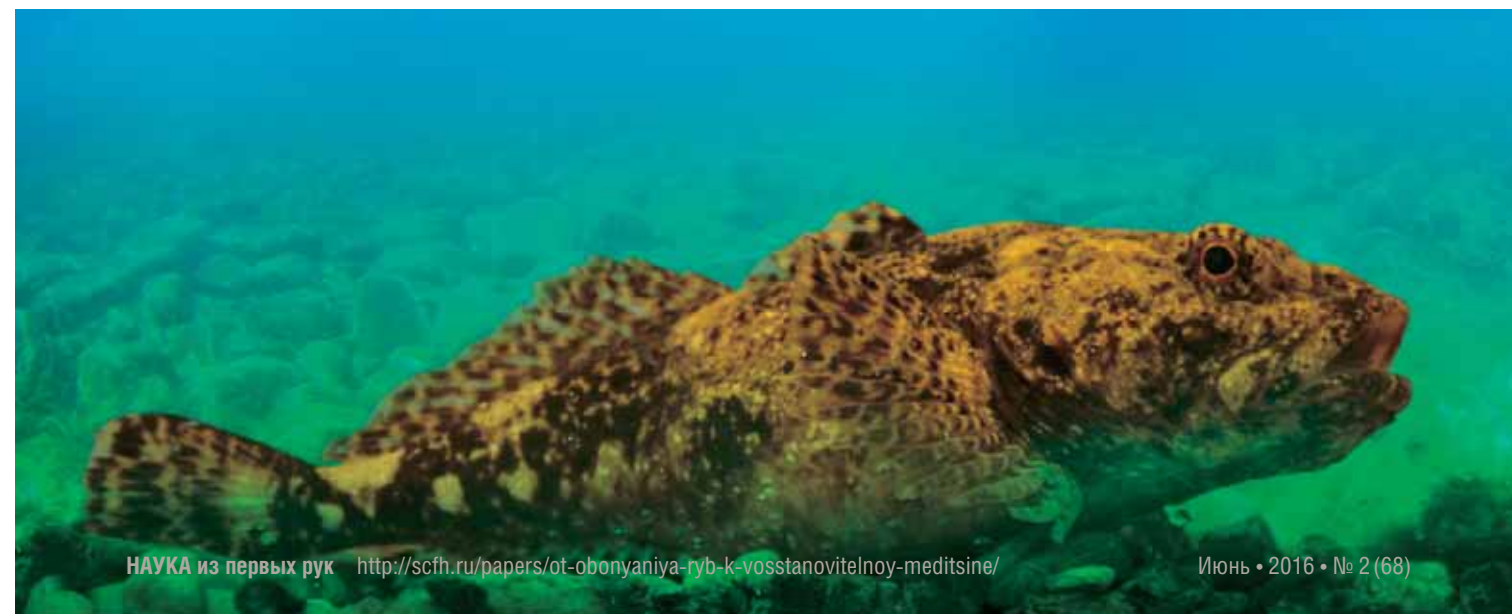
Теоретическая основа для этого есть: структурно-функциональные свойства обонятельного эпителия у рыб и человека принципиально ничем не отличаются, и нужно провести исследования на млекопитающих. Одорантную обработку эпителия лучше производить одорантом, находящимся в водорастворимой, а не летучей форме, вводя раствор в полость носа. Таким способом нейроны должны лучше активироваться и, соот-

ветственно, интенсивнее деградировать с последующей компенсаторной активацией деления стволовых клеток и формированием пула малодифференцированных нейтральных клеток, имеющих потенциал для использования в медицине. С практической точки зрения, взятие такой биопсии – несложная задача.

Другой аспект состоит в том, что обонятельная система вовлечена в развитие ряда социально значимых нейродегенеративных заболеваний – это болезнь Альцгеймера, паркинсонизм и некоторые другие. Известно, что деменция (нарушение высших функций мозга), как правило, с возрастом, сопровождается снижением количества хемочувствительных клеток и обонятельной дисфункцией. Если мы научимся неинвазивно стимулировать нейрогенез на уровне периферического отдела обонятельного анализатора, то количество утраченных клеток хотя бы частично может быть восполнено. Нельзя исключать того, что возросший сенсорный приток запахов каким-то образом сможет положительно воздействовать на центральные структуры мозга, с которыми связаны обонятельные клетки. Можно даже предположить, что именно этот феномен лежит в основе лечебного воздействия ароматерапии, зародившейся много веков назад в странах Востока.

В заключение хочется привести слова нашего коллеги, крупного специалиста в области нейробиологии, профессора Н. С. Косицына (Институт ВНД и НФ, Москва): «В этих исследованиях Байкал выступает даже не как уникальное, богатое эндемиками озеро, а как «метод», методологический подход, который дает нам естественные модели, на которых можно изучать сложные вопросы не только биологии, но и медицины».

Самец большеголовой широколобки (*Batrachocottus baicalensis* Dybowski, 1874)



Литература

Викторов И. В., Савченко Е. А., Ухова О. В. и др. Мультипотентные стволовые и прогениторные клетки обонятельного эпителия // *Клеточные технологии в биологии и медицине*. 2006. № 4. С. 185–19.

Buck L., Axel R. A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition // *Cell*. 1991. V. 65, N 1. P. 175–187.

Ignatieva E. V., Levitsky V. G., Yudin N. S. et al. Genetic basis of olfactory cognition: extremely high level of DNA sequence polymorphism in promoter regions of the human olfactory receptor genes revealed using the 1000 Genomes Project dataset // *Front Psychol*. 2014. V. 5. Article 247. Published online.

Klimenkov I. V., Kurylev A. V., Kositsyn N. S. et al. Olfactory Receptor Cells' Dendritic Neurosecretion Phenomenon // *World neurosurgery*. 2015. V. 83, N 3. P. 278–279.

Leng G., Ludwig M. Neurotransmitters and peptides: whispered secrets and public announcements // *J. Physiol*. 2008. V. 586, N 23. P. 5625–5632.

Malki A., Fiedler J., Fricke K. et al. Class I odorant receptors, TAS1R and TAS2R taste receptors, are markers for subpopulations of circulating leukocytes // *J. Leukoc. Biol*. 2015. V. 97, N 3. P. 533–545.

Mombaerts P. Odorant receptor gene choice in olfactory sensory neurons: the one receptor-one neuron hypothesis revisited // *Curr. Opin. Neurobiol*. 2004. V. 14, N 1. P 31–36.

Schultze M. *Über die Endigungsweise des Geruchsnerven und der Epithelialgebilde des Nasenschleimhaut* // *Monatsber Deut Akad. Wiss. Berlin*. 1956. Bd. 21. S. 504–514.

Son S. J., Filosa J. A., Potapenko E. S. et al. Dendritic peptide release mediates interpopulation crosstalk between neurosecretory and preautonomic networks // *Neuron*. 2013. V. 78, N 6. P. 1036–1049.

РЫБЫ БАЙКАЛА в борьбе с атеросклерозом

О новом экспериментальном
объекте для медицины

Нарушения обмена холестерина (холестерина) приводят к развитию атеросклероза и являются причиной инфаркта миокарда или инсульта. Атеросклероз и спровоцированные им сердечно-сосудистые заболевания вносят основной вклад в смертность среди населения России и других индустриально развитых стран. Для разработки эффективных методов ранней диагностики и лечения этого заболевания необходимо детально знать механизмы его развития. И в этом, как ни удивительно, могут помочь рыбы озера Байкал

Ключевые слова: холестерин, липопротеиды, Байкал, рыбы, Cottoidei, животные модели, атеросклероз, атерогенные липопротеиды, антиатерогенные липопротеиды.
Key words: cholesterol, lipoproteins, Baikal, fish, Cottoidei, animal models, atherosclerosis, atherogenic lipoproteins, antiatherogenic lipoproteins

© Н. П. Судаков, И. В. Клименков, М. В. Пастухов, 2016

СУДАКОВ Николай Петрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научного отдела экспериментальной хирургии с виварием Иркутского научного центра хирургии и травматологии и отдела медико-биологических исследований и технологий Иркутского научного центра СО РАН, доцент Иркутского государственного университета. Автор и соавтор 50 научных работ и 1 патента

КЛИМЕНКОВ Игорь Викторович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН (Иркутск), доцент Иркутского государственного университета. Автор и соавтор 60 научных работ

ПАСТУХОВ Михаил Владимирович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией экологической геохимии Института геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 60 научных работ





Различия концентраций холестерина крови (а) и соотношений его атерогенных и антиатерогенных фракций (б) в крови рогатковидных рыб озера Байкал

Сверху вниз: длиннокрылка (*Cottocomephorus inermis*, Yakovlev, 1890); большая красная широколобка (*Procottus major*, Taliev, 1944); байкальская большеголовая широколобка (*Batrachocottus baicalensis*, Dybowski, 1874); плоская широколобка (*Limnocottus bergianus* Taliev, 1935)

Холестерин, или, как более правильно называют его по химической номенклатуре, *холестерол* и другие жиры переносятся по кровотоку в виде *липопротеидов*. Это достаточно сложно устроенные частицы, состоящие из «капли» жира и специальных белков, которые помогают взаимодействовать этим каплям с клетками организма. Липопротеиды либо частично обмениваются липидами с клетками, либо полностью захватываются ими.

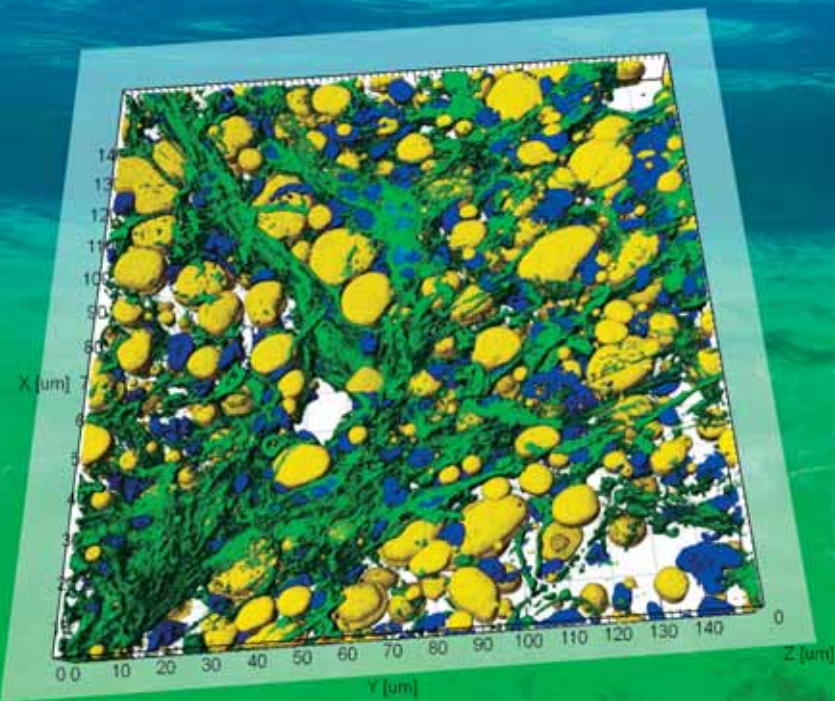
Холестерол – плохой и хороший

Нарушения обмена холестерина в основном характеризуются повышением его уровня в крови, при этом изменяется соотношение его фракций. Есть несколько типов липопротеидов (или фракций холестерина). К первому типу относят *липопротеиды очень низкой плотности* (ЛПОНП) и *липопротеиды низкой плотности* (ЛПНП) – это атерогенные липопротеиды,

как говорят пациенты, «плохой» холестерол, который как раз и является основной причиной развития атеросклеротических бляшек. Эти частицы переносят холестерол из печени к клеткам кровеносных сосудов. Второй тип – «хороший» холестерол, или антиатерогенные липопротеиды: *липопротеиды высокой плотности* (ЛПВП), которые транспортируют холестерол, наоборот, от сосудов к клеткам печени и таким образом сдерживают развитие атеросклероза. Печень служит главным регулятором обмена холестерина и других жиров и может выводить из организма его избыток с желчью.

Организм с помощью сложных биохимических, генетических механизмов, из которых еще далеко не все известны, поддерживает тонкое равновесие между фракциями «плохого» и «хорошего» холестерина крови. Это равновесие может быть нарушено, и важно знать механизмы, управляющие адаптацией обмена холестерина крови, сохраняющие баланс между «плохими» и «хорошими» фракциями при действии различных неблагоприятных факторов. Таких факторов достаточ-





Многочисленные крупные липидные капли в клетках печени большой красной широколобки (*Procottus major*). Ядра клеток окрашены DAPI (синий); жировые капли окрашены специфичным для липидов красителем Nile Red (желтый); актиновый цитоскелет – фаллоидином, конъюгированным с FITC (зеленый). Лазерная конфокальная микроскопия

но много: диета с высоким содержанием холестерина, курение, накопление жира в клетках печени и многое другое (Климов, Никульчева, 1999).

Байкальская модель

Все виды животных обладают индивидуальными особенностями системы обмена холестерина, и это определяет степень устойчивости к развитию нарушений липидного обмена. Видоспецифичные различия в системах обмена холестерина – уникальный материал для выявления механизмов устойчивости к патологическим изменениям и их возможного использования в профилактике и лечении сердечно-сосудистых заболеваний человека. Например, сравнительный анализ соотношений фракций холестерина крови у устойчивых к развитию атеросклероза животных помог выявить в этом важную роль ЛПВП (Климов, Никульчева, 1999), благодаря чему холестерол ЛПВП и стали называть «хорошим».

Для таких исследований заболевание искусственно воспроизводят (моделируют) на животных. К сожалению, используемые в настоящее время модельные организмы относятся к разным систематическим группам: млекопитающим, птицам, рыбам (Getz, Reardon, 2012), и имеют между собой очень отдаленное эволюционное и, соответственно, генетическое родство, что затрудняет понимание общих закономерностей адаптации обмена холестерина. Для решения поставленной задачи нужно изучать группы генетически близких организмов, но за-

нимающих различные экологические ниши и имеющих в связи с этим разные показатели липидного обмена.

Подходящей моделью могут быть эндемичные близкородственные представители рогатковидных рыб озера Байкал (Cottoidei). Это группа рыб из 26 видов, которые произошли от небольшого количества исходных форм (Sideleva, 2003). Разные виды Cottoidei отличаются широким разнообразием, адаптированы к различным условиям обитания и пищевому рациону с разным уровнем риска развития атеросклероза. Важно, что по сравнению с другими водными бассейнами в озере Байкал минимально антропогенное загрязнение (Shimaraev *et al.*, 2000), что позволяет исключить возможность связанного с ним искажения данных.

Разные виды – разные липиды

Для исследований были выбраны четыре вида рыб Cottoidei с разным типом питания и поведения: большая красная широколобка (*Procottus major*, Taliev, 1944), длиннокрылка (*Cottocomephorus inermis*, Yakovlev, 1890), плоская широколобка (*Limnocottus bergianus*, Taliev, 1935) и байкальская большеголовая широколобка (*Batrachocottus baicalensis*, Dybowski, 1874) (Sudakov *et al.*, 2015). Уровень суммарного холестерина в крови рыб оказался специфичным для каждого вида. Самый низкий уровень холестерина, кстати, сопоставимый с таковым у человека (Flaim *et al.*, 1981), наблюдался у длиннокрылки, обитающей в толще воды. У остальных трех видов, обитающих на дне, этот показатель был более высоким.

Еще сильнее различался фракционный состав холестерина. Самый высокий уровень антиатерогенного холестерина был у большой красной широколобки, а самый низкий – у длиннокрылки, но при этом у обоих этих видов содержание атерогенного холестерина было низким. Напротив, у плоской широколобки и байкальской большеголовой широколобки атерогенный холестерол был высоким. Другими словами, у большой красной широколобки «хороший» холестерол преобладает над «плохим», а у остальных трех видов – наоборот, «плохой» холестерол преобладает над «хорошим».

Интересно, что наблюдаемые различия липидных спектров крови рыб не являются следствием их особенностей питания. Это говорит о том, что уровни фракций холестерина крови этих близкородственных организмов жестко predeterminedены на генетическом уровне. Например, несмотря на то что плоская широколобка и большая красная широколобка питаются преимущественно амфиподами (ракообразными), их липидные спектры крови противоположны по соотношению атерогенной и антиатерогенной фракций холестерина. Поразительно, что к показателям питающейся в основном амфиподами плоской широколобки близок липидный спектр наиболее активного хищника семейства Cottoidei – байкальской большеголовой широколобки. Амфиподы составляют 70% ее пищевого рациона, но оставшиеся 30% – другие Cottoidei.

Кроме того, рыбы могут представлять интерес в связи с важной ролью их печени в запасании жиров (Henderson, Torcher 1987). Микроскопический анализ показал, что в ткани печени Cottoidei много клеток с крупными липидными каплями. Высокое содержание липидов в печени некоторых представителей рогатковидных рыб было обнаружено и биохимическими методами (Kozlova, 1998). Удивительно, но большой объем жировых капель в клетках печени рыб не сопровождается развитием нарушений обмена холестерина и атеросклерозом, что было бы невозможным у человека и других млекопитающих. Видимо, жировые капли – неотъемлемый компонент клеток печени Cottoidei, как и многих других рыб, а не патологические образования, как это бывает при избыточном накоплении жиров в печени млекопитающих (Takahashi *et al.*, 2012).

Исследованные виды Cottoidei – это уникальный комплекс модельных организмов, на которых можно изучать генетические, физиологические и экологические механизмы устойчивости к развитию нарушений обмена холестерина и атеросклероза.

Несмотря на общность происхождения, представители видов имеют широкий диапазон значений уровня общего холестерина крови и его фракций, четко выраженные индивидуальные особенности липидного спектра крови. Исследуя механизмы, формирующие

эти различия, мы приблизимся к пониманию закономерностей адаптации обмена холестерина и устойчивости к развитию атеросклероза, а особенности содержания жиров в печени рыб помогут понять механизмы устойчивости к негативным эффектам их избыточного накопления в печени.

Литература

- Климов А.Н., Никульчева Н.Г. Обмен липидов и липопротеидов и его нарушения. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Пупер Ком, 1999. 512 с.
- Getz G. S., Reardon C. A. Animal models of atherosclerosis // *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* 2012. V. 32, N 5. P. 1104–1115.
- Flaim E., Ferreri L. F., Thyse F. W. et al. Plasma lipid and lipoprotein cholesterol concentrations in adult males consuming normal and high cholesterol diets under controlled conditions // *Amer. J. Clin. Nutr.* 1981. V. 34, N 6. P. 1103–1108.
- Henderson R. J., Torcher D. R. The lipid composition and biochemistry of freshwater fish // *Prog. Lipid Res.* 1987. V. 26. P. 281–347.
- Kozlova T. A. Lipid class composition of benthic-pelagic fishes (*Cottocomephorus*, *Cottoidei*) from Lake Baikal // *Fish. Physiol. Biochem.* 1998. V. 19, N 3. P. 211–216.
- Martirosyan D. M., Miroshnichenko L. A., Kulokawa S. N. et al. Amaranth oil application for heart disease and hypertension // *Lipids Health Dis.* 2007. V. 6. Article 1. Published online.
- Shimaraev M. N., Parfenova V. V., Kostornova T. Ya. et al. Exchange processes and distribution of microorganisms in the deep zone of Lake Baikal // *Dokl. Biol. Sci.* 2000. V. 372. P. 279–282.
- Sideleva V. G. Endemic fishes of Lake Baikal. Backhuys Publishers. Leiden. Netherlands, 2003. P. 270.
- Sudakov N. P., Klimenkov I. V., Pastukhov M. V. Lake Baikal Endemic Sculpins (*Cottoidei*): A Promising Model to Study Adaptive Plasticity of Blood Cholesterol Metabolism // *Brazilian Arch. Biol. and Technol.* 2015. V. 58, N 4. P. 613–616.
- Takahashi Y., Soejima Y., Fukusato T. Animal models of nonalcoholic fatty liver disease/nonalcoholic steatohepatitis // *World J Gastroenterol.* 2012. V. 18. P. 2300–2308.





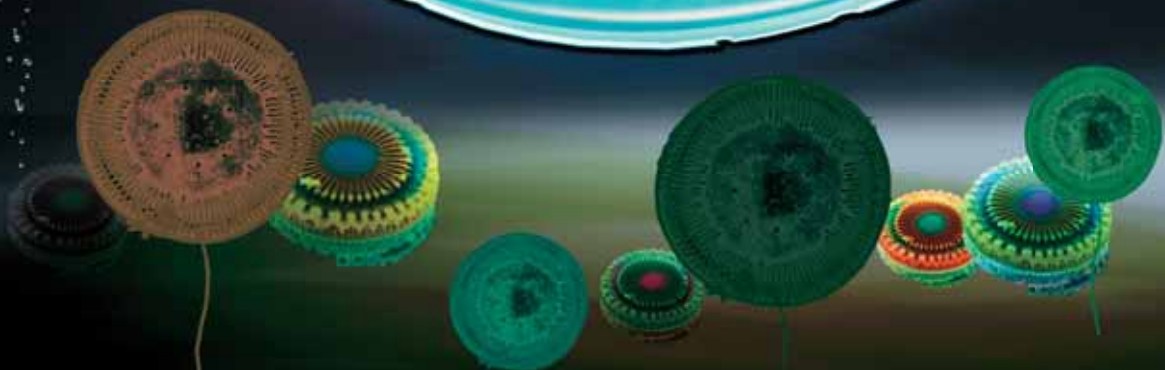
ЖИВОЙ кремний БАЙКАЛА

Кремний – один из самых широко распространенных химических элементов в земной коре, однако при этом он не является структурообразующим элементом живых организмов, а в высоких концентрациях токсичен для живых клеток. Тем не менее многие организмы, такие как губки, радиолярии, а также высшие растения, особенно злаки, довольно активно используют кремний для создания каркасных структур своего тела. Но наибольшую роль кремний играет в жизни хризофитовых и диатомовых водорослей, в биомассе которых содержание кремнезема может превышать 50%.

Диатомеи известны как искусные создатели разнообразных кремнеземных 3D структур нанометрового размера. Для описания способа, которым они строят свои кремниевые экзоскелеты, даже был введен термин «диатомовые нанотехнологии». Диатомовой водоросли приходится решать сразу несколько очень непростых задач: сначала добыть кремниевую кислоту из окружающей среды – морской или пресной воды, где ее концентрации довольно низки; затем хранить кислоту в клетке, пока не придет время доставить ее в строго определенные точки формирующейся створки, где она и будет полимеризоваться. Чтобы в результате получились створки сложной заданной структуры, весь процесс отложения кремнезема внутри клеток диатомей должен точно регулироваться.

Кремниевые технологии составляют основу микроэлектроники и востребованы во многих областях современного промышленного производства, от энергетики до металлургической промышленности. Поскольку в диатомовых «нанотехнологиях» не используются экстремально высокие температуры и «тяжелая химия», они вызывают огромный интерес специалистов из самых разных областей.

Диатомеи – самая многочисленная группа водорослей на Байкале, включающая как широко распространенные, так и редкие и эндемичные виды. Сегодня мы представляем результаты молекулярно-генетических исследований молодых сотрудников иркутского Лимнологического института, направленных на «реконструкцию» механизмов «импорта» кремния и формирования кремнеземных створок у байкальских диатомей.



КРЕМНИЕВЫЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ «В ПРОБИРКЕ»



Умение диатомовых водорослей искусно манипулировать кремнием, которое эволюционировало и «оптимизировалось» десятки миллионов лет, в эпоху высоких технологий вызывает живейший интерес ученых. Термин «диатомовые нанотехнологии» (*diatom nanotechnologies*) ввел еще в 1988 г. американский исследователь Р. Гордон (Gordon, Aguda, 1988). Сейчас применительно ко всей группе пигментированных гетероконтов, к которым относятся не только диатомеи, но и хризофитовые, можно говорить о крем-

ниевых нанотехнологиях (*silicon nanotechnologies*) в широком смысле (Grachev *et al.*, 2008). Поэтому неудивительно, что макро- и микропроцессы морфогенеза и сама структура кремнеземных створок водорослей привлекают сегодня внимание специалистов из самых разных областей.

Благодаря своим оптическим свойствам и большой площади поверхности, на которой могут быть иммобилизованы антитела и ферменты, панцири диатомей могут использоваться в качестве биосенсоров (Gale

Ключевые слова: диатомовые водоросли, морфогенез, колхицин, паклитаксел, биологический кремнезем, микроструктуры, наноструктуры.

Key words: diatoms, morphogenesis, colchicine, paclitaxel, biosilica, microstructures, nanostructures

Е. Д. БЕДОШВИЛИ, К. В. ГНЕУШЕВА

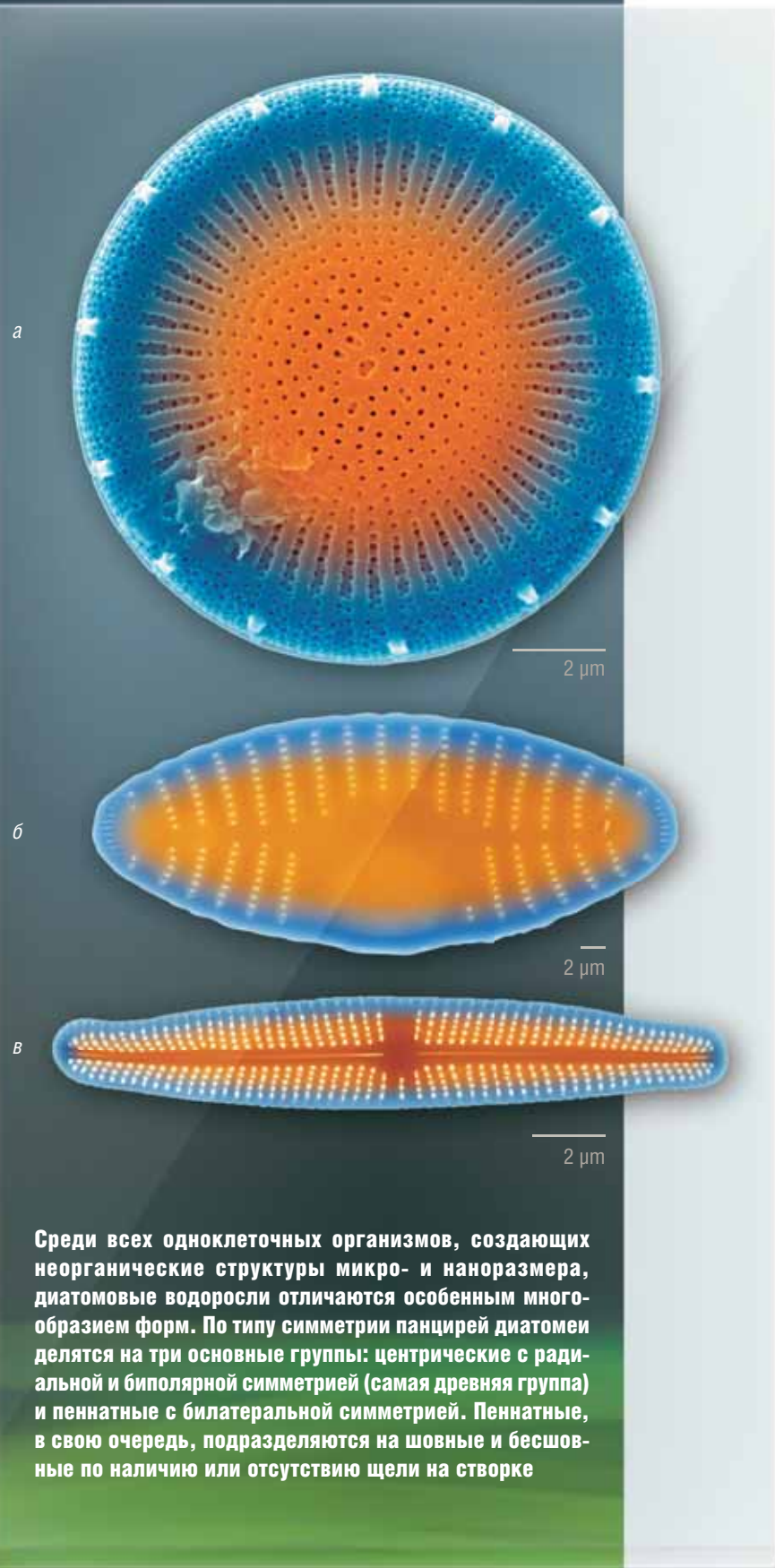


БЕДОШВИЛИ Екатерина Джамбулатовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 13 научных работ



ГНЕУШЕВА Ксения Васильевна – аспирант отдела ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Соавтор 1 научной работы

© Е. Д. Бедошвили, К. В. Гнеушева, 2016



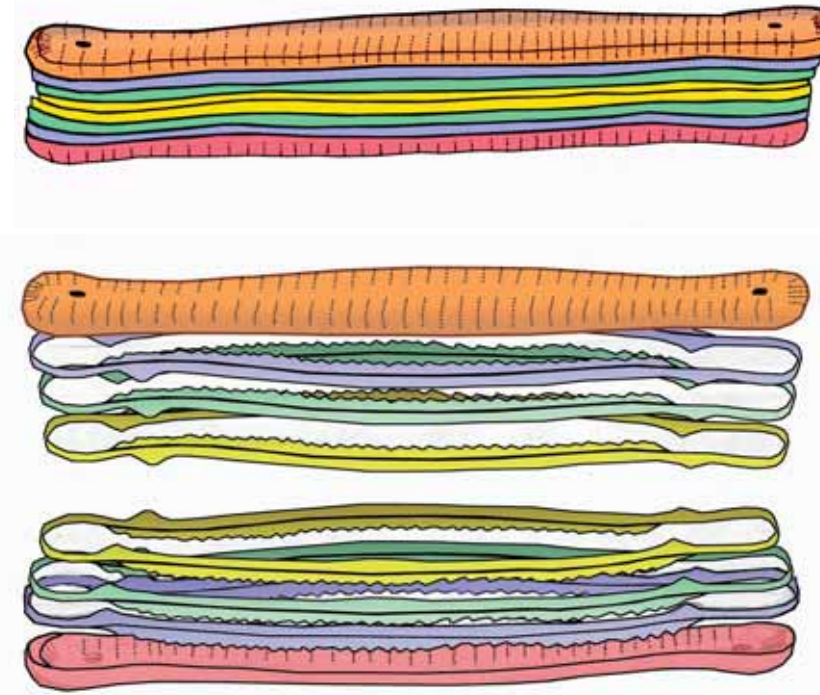
Среди всех одноклеточных организмов, создающих неорганические структуры микро- и наноразмера, диатомовые водоросли отличаются особым многообразием форм. По типу симметрии панцирей диатомеи делятся на три основные группы: центрические с радиальной и биполярной симметрией (самая древняя группа) и пеннатные с билатеральной симметрией. Пеннатные, в свою очередь, подразделяются на шовные и бесшовные по наличию или отсутствию щели на створке

et al., 2009; Sheppard *et al.*, 2012). Недавно была показана возможность их применения для целевой доставки плохо растворимых в воде лекарственных препаратов, например, антираковых (Delalat *et al.*, 2015).

Панцири диатомеи являются и объектом трибологии – науки, исследующей контактные взаимодействия твердых деформируемых тел при их относительном перемещении. При этом особое внимание привлекают способы объединения клеток водорослей в колонии с помощью соединительных кремнеземных конструкций и адгезивных веществ, которые они выделяют (Кроуфорд, Гибшубер, 2006, Gebeshuber, 2007). Диатомеи могли бы стать и экономичной заменой таких нанотехнологий, как планарная литография, которая используется для создания «плоских» полупроводниковых приборов, интегральных микросхем, а также некоторых сверхпроводниковых наноструктур. Один из этапов этой технологии – формирование в чувствительном слое на поверхности подложки рельефного рисунка, повторяющего топологию микросхемы. Вот если бы диатомею можно было «заказать» конкретный рисунок!

Диатомеи с разными типами симметрии панцирей:

- а – центрическая диатомея *Stephanodiscus* sp. с радиальной симметрией;
- б – пеннатная бесшовная диатомея *Fragilaria vausheriae* var. *capucina* с билатеральной симметрией;
- в – пеннатная шовная диатомея *Achnanidium sibiricum* с билатеральной симметрией



вались вещества, ингибирующие работу микротрубочек (колхицин, люмиколхицин, оризалин и др.), водоросли формировали створки с разнообразными аномалиями.

В отделе ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН была впервые в мире исследована роль цитоскелета в морфогенезе створки на синхронизированной культуре диатомовых

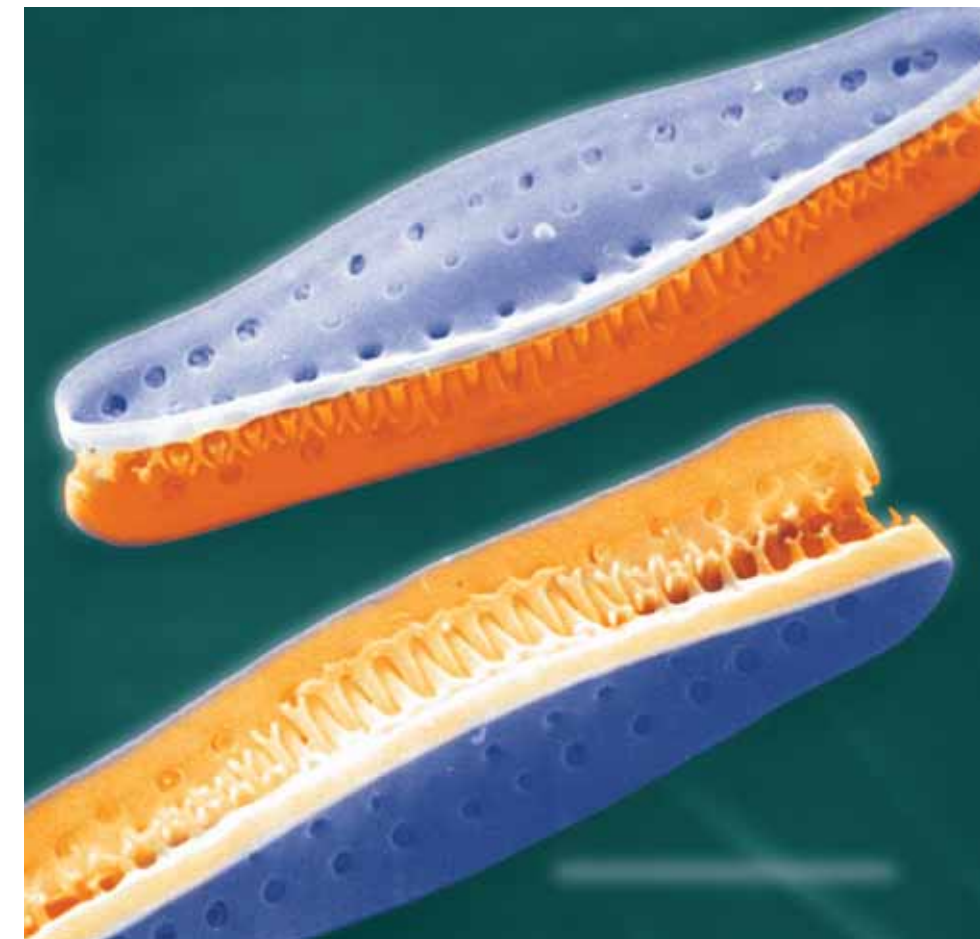
Панцирь диатомеи состоит из двух перекрывающихся створок, соединенных друг с другом подобно мыльнице с помощью системы поясковых ободков

Пары соединенных створок сестринских клеток *Cymatoseira*. Фото Р. М. Кроуфорд, И. Гибшубер

Эта мечта волнует многих – ее реализация могла бы стать основой принципиально новых биотехнологических производств. Однако несмотря на всю возможную пользу и экономическую выгоду, мы еще далеки от полного понимания генетических и клеточных процессов, лежащих в основе морфогенеза кремнеземного панциря диатомеи, хотя эти исследования ведутся с середины прошлого века.

Ключевое звено – микротрубочки

Кремнистая створка диатомовых водорослей формируется в специализированной внутриклеточной органелле – везикуле отложения кремнезема, окруженной специфической мембраной – силикалеммой. На сегодня известно, что важную роль в формировании створки играет цитоскелет, в частности, микротрубочки, которые у некоторых видов диатомеи удалось визуализировать с помощью флуоресцентной и конфокальной микроскопии. В экспериментах, где использо-



водорослей, где все клетки находятся на одной и той же стадии клеточного цикла. Добиться синхронизации клеточных культур диатомей сравнительно несложно: для этого достаточно содержать их некоторое время в бескремневой среде. Клетки сначала будут усиленно тратить свой запасенный кремний на построение панциря, а как только он весь израсходуется, они перестанут делиться и остановятся на определенной стадии жизненного цикла. При добавлении кремния в среду клетки вновь начинают процесс формирования новых створок и деления.

«Подопытной» стала диатомея *Synedra acus* subsp. *radians* – эта водоросль в течение нескольких лет служит в ЛИН СО РАН модельным объектом при изучении всех аспектов морфогенеза створки и хорошо размножается в лабораторной культуре. В экспериментах использовались два ингибитора работы микротрубочек с разным механизмом действия – колхицин и, впервые, паклитаксел. Колхицин блокирует сборку новых микротрубочек, связываясь с их растущими концами. Микротрубочки, которые подверглись деполимеризации, уже не могут восстановиться и вскоре разрушаются; при удалении колхицина из среды они восстанавливаются. Паклитаксел, напротив, блокирует деполимеризацию микротрубочек, связываясь с белком β -тубулином, что вызывает образование пучков микротрубочек.

Эксперименты на синхронизированной культуре синедры показали, что добавление колхицина в определенный момент морфогенеза позволяет получить новые кремнеземные формы с определенной структурой (Kharitonenko *et al.*, 2015). Так, самое большое количество створок с неравномерными и непараллельными

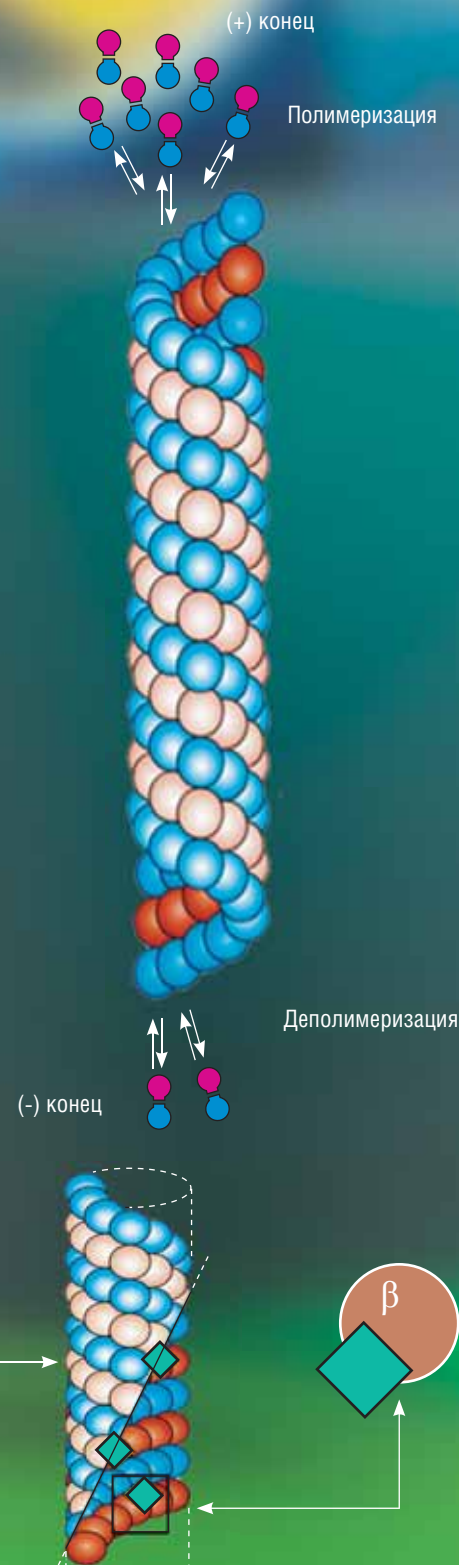
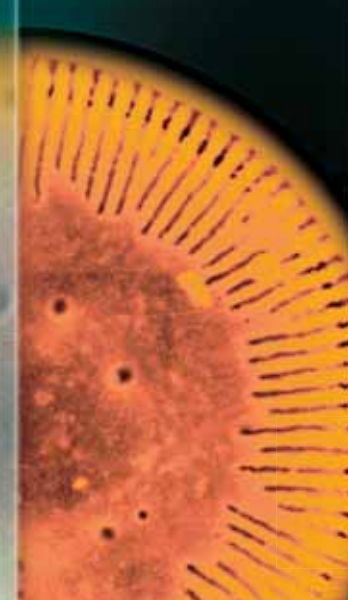
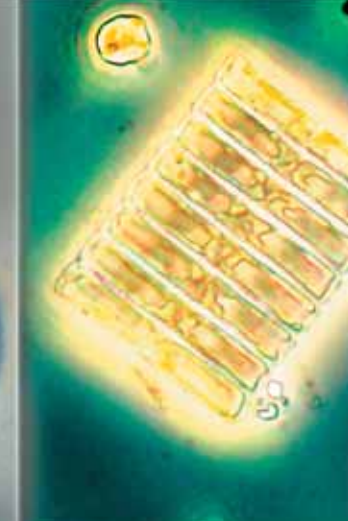
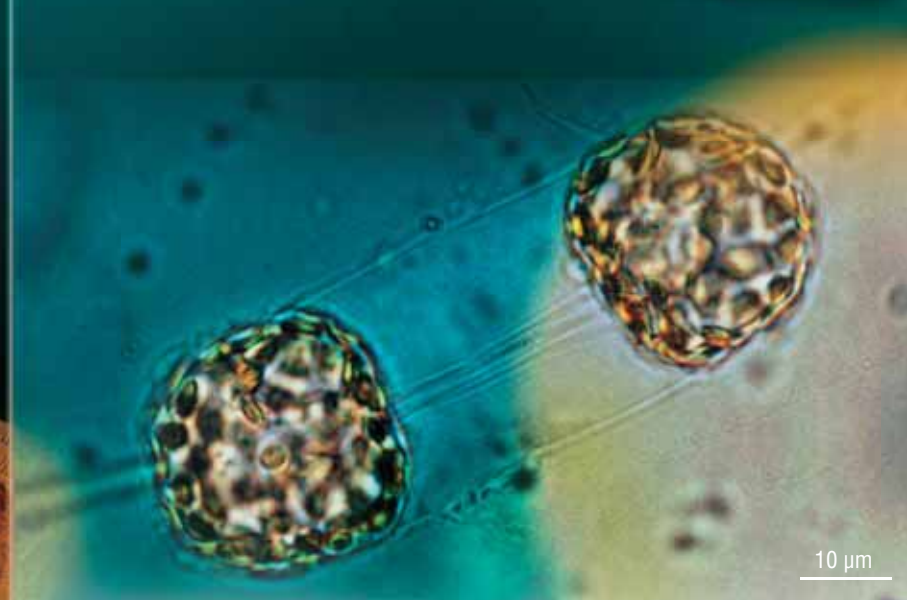
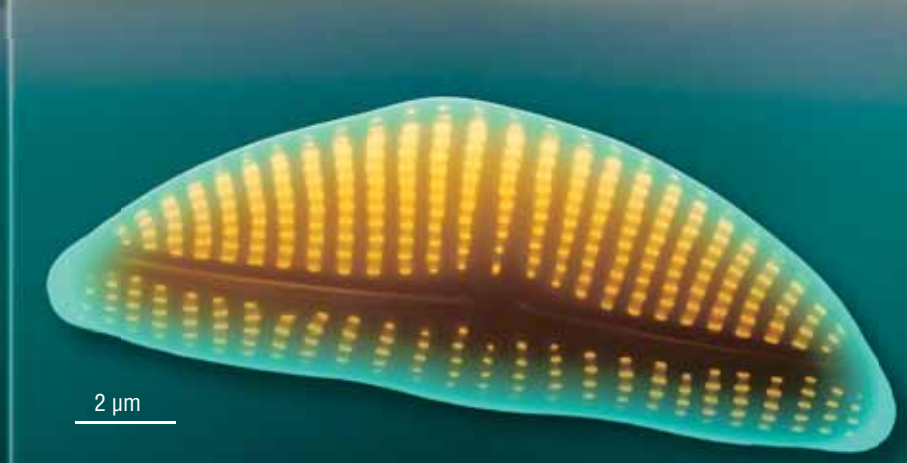
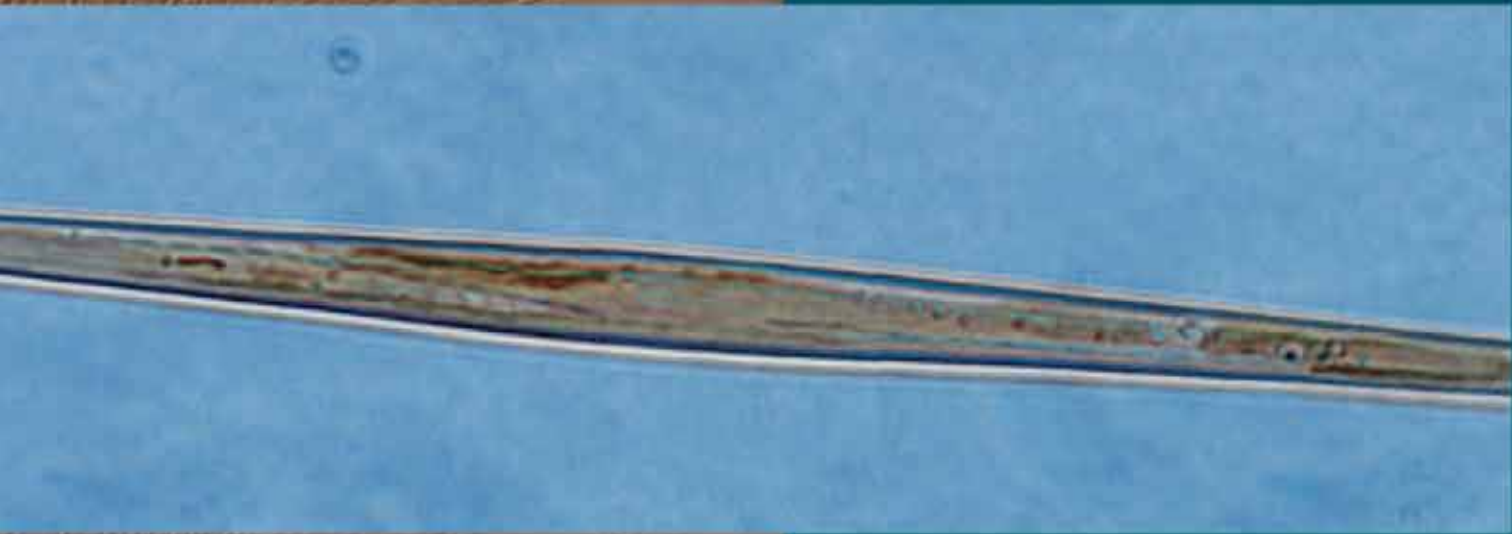


Схема работы микротрубочек и паклитаксела.
По: (Dumontet, Jordan, 2010)

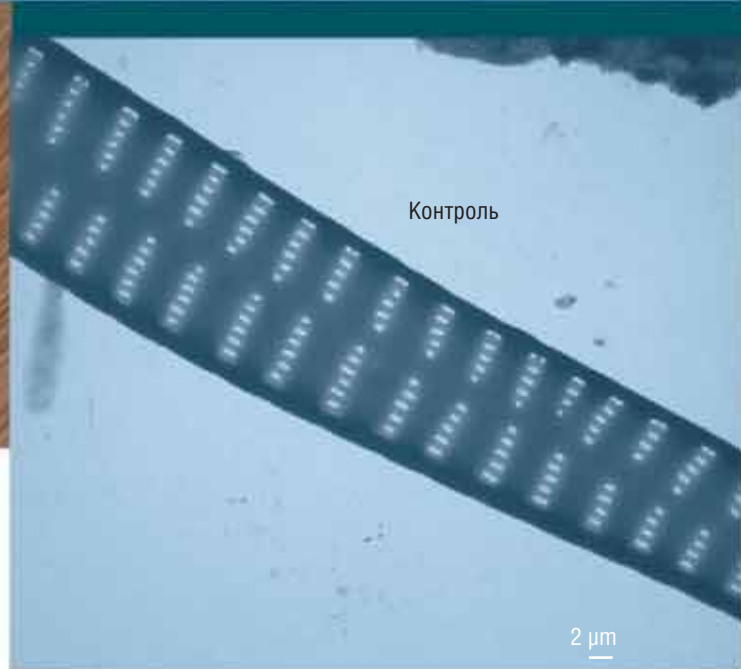




Диатомовая водоросль *Synedra acus*.
Световая микроскопия

В синхронизированной культуре клеток пеннатной бесшовной диатомовой водоросли *Synedra acus* при добавлении колхицина и паклитаксела увеличивается доля клеток с различными аномалиями строения кремнеземного панциря. В случае паклитаксела наблюдаются и такие редкие аномалии, как крупные отверстия в створке. Просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия

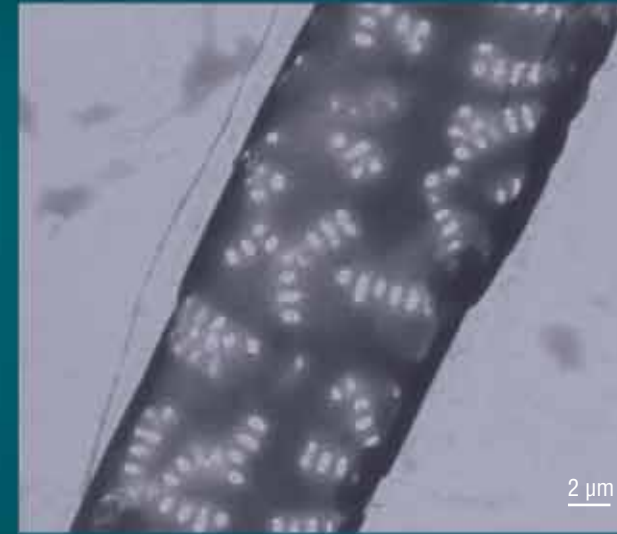
рядами ареол (отверстий) встречается при добавлении колхицина через 1,5 часа после начала морфогенеза створки, а самое большое количество искривленных створок – через 0,5 часа. Самое интересное – створки без ареол появляются, только если добавить колхицин через 2,5 часа после начала морфогенеза! Это справедливо и в отношении паклитаксела, причем при использовании обоих этих ингибиторов доля створок с аномалиями и характер изменений их морфологии



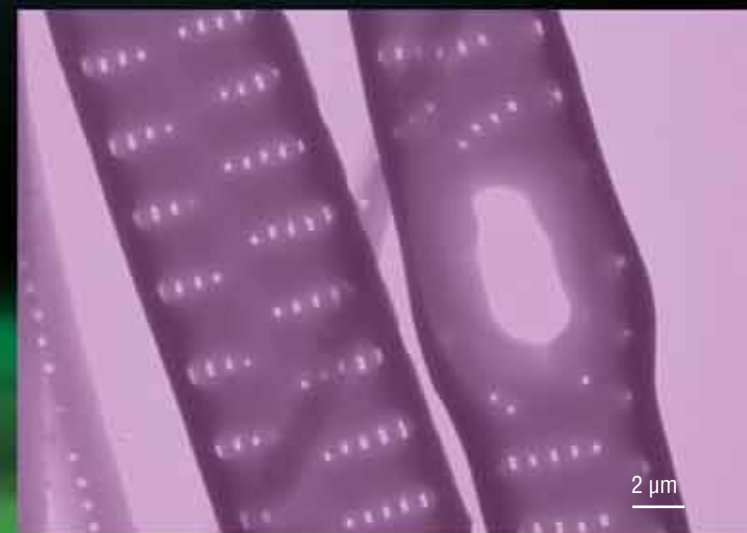
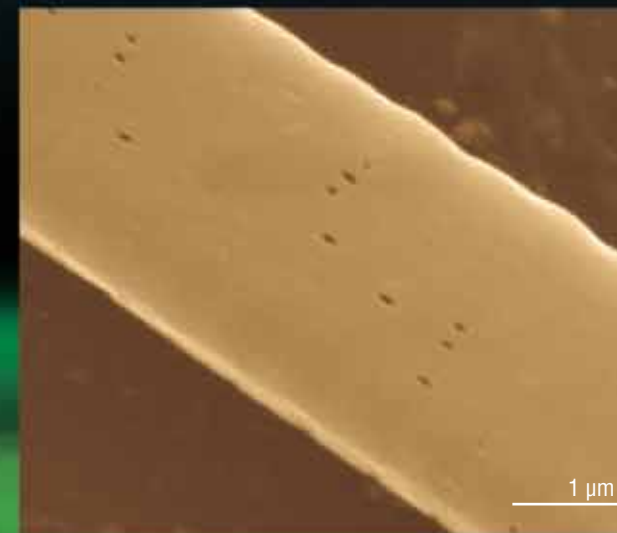
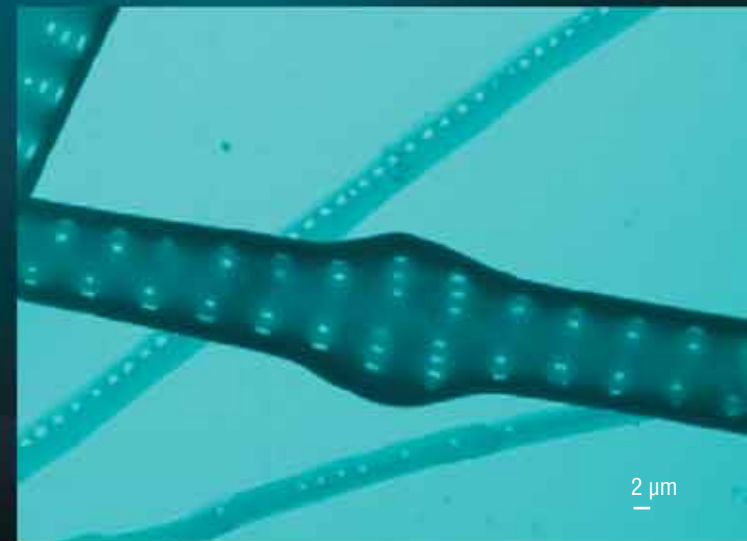
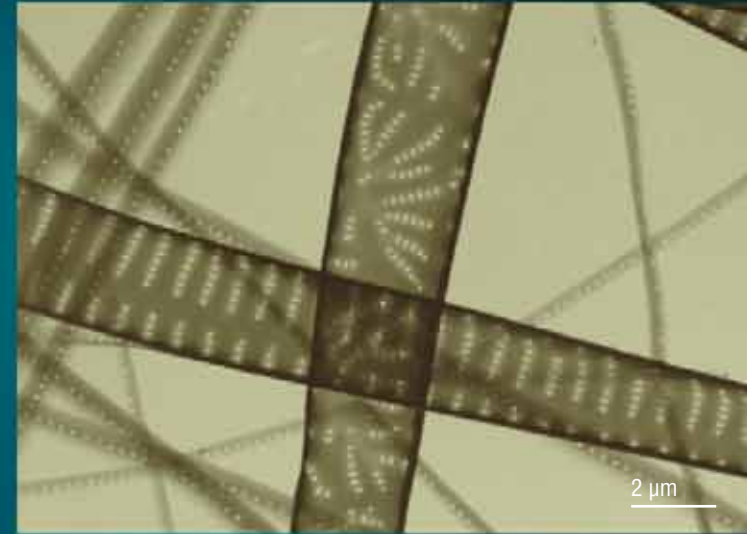
зависит от стадии морфогенеза, на которой ингибиторы добавляют в среду с культурой водоросли.

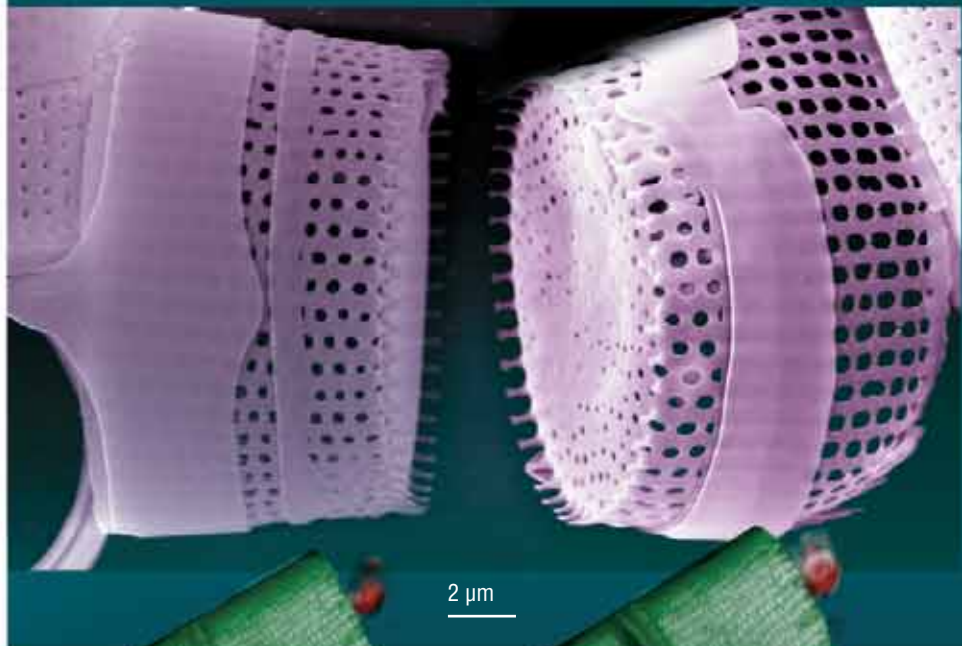
Однако воздействие паклитаксела приводит к появлению и таких аномалий в строении створки, которые не наблюдаются в случае применения колхицина. Среди них – крупные отверстия в створке (единичные случаи), а также расширение створки, довольно часто встречающееся при использовании паклитаксела на начальных стадиях морфогенеза.

Synedra acus при добавлении колхицина



Synedra acus при добавлении паклитаксела





Слева: нормальные «стаканчики» – очищенные кремнеземные створки *A. islandica*. Сканирующая электронная микроскопия
Справа: живая колония *A. islandica* из лабораторной культуры. Световая микроскопия

Как из «стаканчика» сделать «трубочку»

Сотруднице ЛИН СО РАН Надежде Волокитиной удалось выделить в лабораторную культуру еще один вид диатомовых водорослей – *Aulacoseira islandica*, доминирующий в байкальском фитопланктоне в определенные сезоны. Морфогенез этой диатомеи, в отличие от синедры, сравнительно мало изучен. У представителей рода *Aulacoseira* створка благодаря своему необычайно высокому загибу напоминает «микростаканчик», а клетки в колониях прочно скреплены особыми соединительными шипами.

Поскольку этот вид имеет тонкий панцирь, который сминается и разрывается при манипуляциях, при оценке воздействия ингибиторов на его морфогенез было решено использовать специальный флуоресцентный краситель, который встраивается в формирующиеся створки и позволяет наблюдать за результатом экспериментального воздействия в конфокальный микроскоп.

С помощью этой технологии удалось показать, что в присутствии колхицина в культуре появляются сросшиеся дочерние створки без перегородки, т.е. «микростаканчики» превращаются в «микротрубочки». Таким образом, если клетке на определенной стадии морфогенеза помешать соорудить «доннышко» (лицевую часть створки), то она впоследствии продолжит строить загиб створки по запрограммированному сценарию, как если бы строители по какой-то причине не построили фундамент здания, а следующая бригада продолжила возведение стен или крыши.



В культуре клеток центральной диатомовой водоросли *Aulacoseira islandica* при добавлении колхицина появляются сросшиеся дочерние створки, их кремнеземный панцирь приобретает вид «микротрубочки» вместо типичного для этого вида «микростаканчика». На фото: 3D-изображение нормальной створки *Aulacoseira islandica* (вверху) и створки без лицевой части (слева). Конфокальная микроскопия

Сегодняшние исследования механизмов формирования створок у диатомовых водорослей позволяют в будущем использовать эти кремниевые бионанотехнологии на благо человечества, хотя сейчас мы находимся лишь в самом начале этого длинного пути. Не исключено, что дальнейшее изучение регуляции работы микротрубочек цитоскелета диатомей на клеточном и генетическом уровнях даст возможность получать культуры мутантных водорослей и «по заказу» создавать кремнеземные структуры с нужными характеристиками.

В публикации использованы фото авторов

Литература

- Кроуфорд Р.М. Губшубер И. Мини-наноинженеры // НАУКА из первых рук. 2006. № 4 (10). С. 48–54
- Delalat B., Sheppard V. C., Ghaemi S. R. et al. Targeted drug delivery using genetically engineered diatom biosilica // Nature Communications. 2015. N. 6.
- Dumontet C., Jordan M.A. Microtubule-binding agents: a dynamic field of cancer therapeutics // Nat. Rev. Drug Discov. 2010. V. 9 P. 790–803.
- Gale D.K., Gutu T., Jiao J., Chang C.-H., Rorrer G.L. Photoluminescence detection of biomolecules by antibody-functionalized diatom biosilica. Advanced Functional Materials. 2009. V. 19. P. 926–933.
- Gebeshuber I. Biotribology inspires new technologies // Nano today. 2007. V. 2 N. 5. P. 30–37.
- Gordon, R. & B.D. Aguda. Diatom morphogenesis: natural fractal fabrication of a complex microstructure // Harris, G. & C. Walker, Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Part 1/4: Cardiology and Imaging, 4–7 Nov. 1988, New Orleans, LA, USA, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1988. V. 10. P. 273–274.
- Grachev M.A., Annenkov V. V., Likhoshvay Ye. V. (2008) Silicon nanotechnologies of pigmented heterokonts // BioEssays. 2008. V. 30. P. 328–337.
- Sheppard V. C., Scheffel A., Poulsen N., Kröger N. Live diatom silica immobilization of multimeric and redox-active enzymes // Appl Environ Microbiol. 2012. V. 78 N. 1. P. 211–218.

ЗАЧЕМ «ЧИТАТЬ» ГЕНОМ *Synedra acus*

Диатомовая водоросль *Synedra acus*, обитающая в Байкале, – один из основных исследовательских объектов молекулярных биологов ЛИН СО РАН.
Фото Н. Волокитиной



В 2015 г. наша исследовательская группа из Лимнологического института СО РАН опубликовала расшифрованный геном диатомовой водоросли *Synedra acus*, обитающей в Байкале. И хотя сейчас «прочитать» геном живого организма гораздо проще и дешевле, чем лет десять назад, эта работа по-прежнему требует сложного оборудования и дорогостоящих реактивов. Почему же ученые из ЛИНа взялись за этот масштабный проект, и почему именно диатомовая водоросль была выбрана в качестве объекта исследования?

Диатомовые водоросли представляют большой интерес для ученых из самых разных областей науки. Благодаря своей многочисленности, разнообразию и широкому распространению – от океанов и озер до торфяных болот и антарктических льдов – диатомеи обеспечивают до 20 % первичной продукции биосферы Земли, к тому же клетки этих водорослей заключены в кремнеземные створки сложной наноразмерной структуры, хорошо сохраняющиеся в геологических отложениях. Тем не менее на данный момент опубликованы геномы всего шести видов диатомей, включая нашу синедру, а это очень мало для такой огромной группы (Armbrust *et al.*, 2004; Bowler *et al.*, 2008; Tanaka *et al.*, 2015; Галачьянц и др. 2015).

МОРОЗОВ Алексей Анатольевич – аспирант и ведущий инженер группы биоинформатики отдела ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 4 научных работ

Диатомеи обеспечивают до 20% первичной продукции биосферы Земли. Это значит, что один из каждых пяти атомов углерода, вовлеченных в биологический круговорот, был ассимилирован из атмосферной углекислоты именно клеткой диатомовой водоросли

Ключевые слова: диатомеи, геномика, филогеномика, эволюция, Синедра.
Keywords: diatoms, genomics, phylogenomics, evolution, Synedra

© А.А. Морозов, 2016

К примеру, в близкой к диатомеям группе оомицетов – сходных с грибами организмов с многоядерным мицелием, у одного только рода фитифтора было отсеквенировано четыре вида из сотни. Дело в том, что фитифторы – это печально известные патогены культурных растений, и если анализ их генома позволит разработать более эффективные методы борьбы с ними, то потраченные на это средства тут же окупятся стократно. Диатомеи же до последнего времени интересовали преимущественно фундаментальную науку. С другой стороны, если ученым удастся «реконструировать» механизмы формирования кремнезменных створок, это станет настоящим прорывом в нанотехнологиях, но не раньше, чем исследования будут завершены. Сейчас же геномикой диатомей во всем мире занимается меньше десятка лабораторий.

Геном как ключ к эволюции диатомей

Секвенирование генома позволяет решать ряд важных задач, которые нельзя или затруднительно решить с помощью других методов исследования, таких как микроскопия или биохимический анализ.

Во-первых, благодаря знанию генетической информации становится гораздо проще искать белки, отвечающие за те или иные функции (Галачьянц и др., 2015). После завершения геномного проекта у исследователя имеется несколько десятков тысяч «прочтенных» генов и, соответственно, предсказанных белков. Часть этих генов может быть опознана сразу, потому что аналогичные им уже были изучены и описаны у других организмов. Для остальных можно, по крайней мере, оценить массу белков, которые они кодируют, а также провести поиск «родственников» в других геномах. Также несложно выяснить, является ли искомым белок трансмембранным или нет, и в какую клеточную органеллу он направится после синтеза. А при наличии транскриптомов (совокупности всех «считанных» с генов нуклеотидных последовательностей, включая мРНК и некодирующие РНК, которые клетка синтезирует в тот или иной период времени) можно узнать, при каких обстоятельствах экспрессируется, т. е. начинает работать тот или иной ген.

Нашу группу в первую очередь интересуют гены, вовлеченные в метаболизм кремния, в то время как основная цель, например, группы японского исследователя Т. Танаки, «прочитавшей» геном *Fistulifera solaris*, состояла в использовании этой морской диатомовой водоросли в качестве продуцента биотоплива (Tanaka et al., 2015).

Во-вторых, лишь при наличии полных геномов (именно во множественном числе!) можно изучать

«После гибели диатомей их пустые прочные кремнистые створки прекрасно сохраняются в осадках. Причем зачастую неповрежденными остаются даже мельчайшие элементы структуры ископаемых стенок диатомей, что позволяет идентифицировать их до вида спустя миллионы лет.

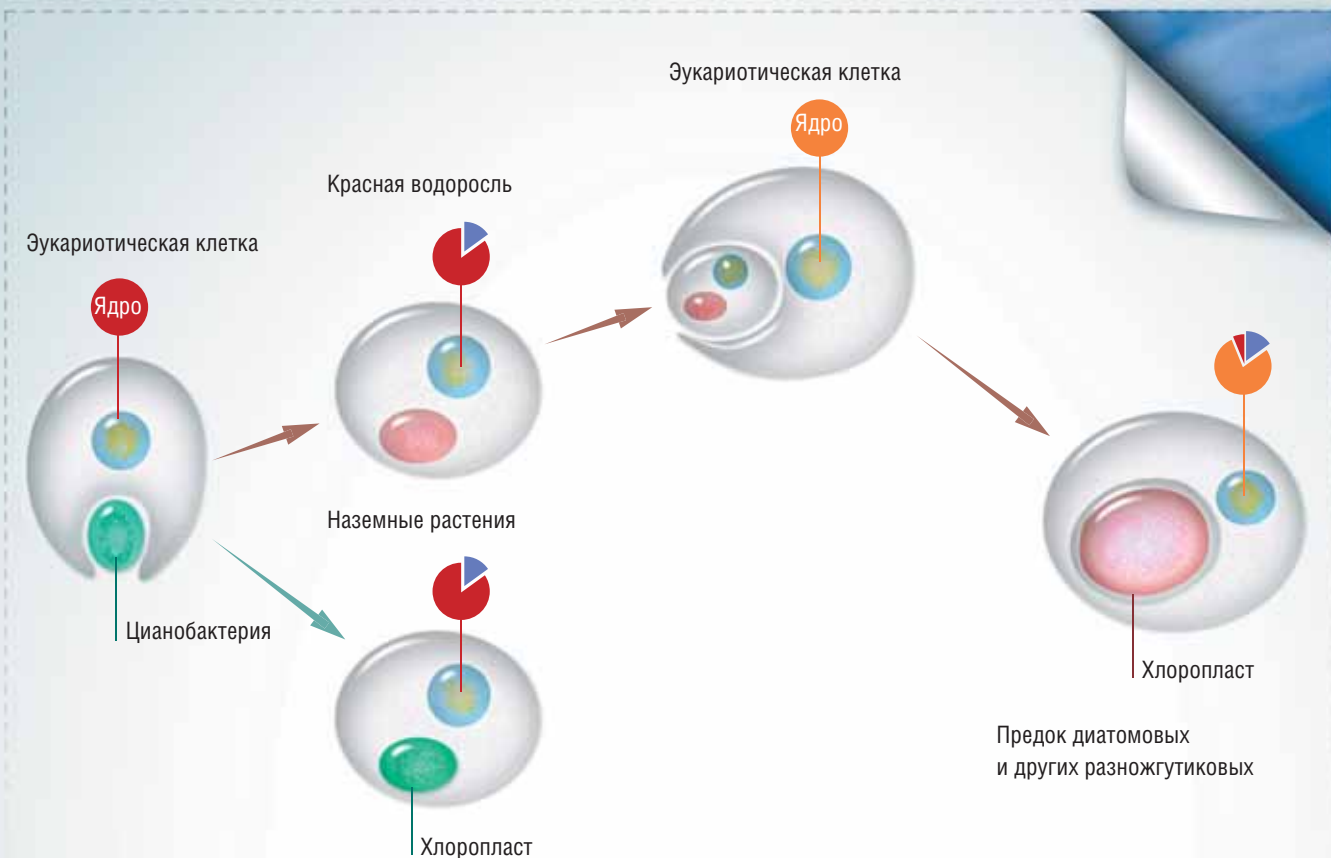
С помощью метода молекулярных часов удалось установить, что диатомовые водоросли появились около 230 млн лет назад. Вероятно, первые диатомеи были обнаженными жгутиковыми клетками (в настоящее время их относят к Heterokonta – разножгутиковым, так как на некоторых стадиях жизненного цикла они имеют один жгутик с тончайшими волосками).

Самые ранние отложения диатомей были найдены в Корее, в осадках, сформировавшихся на суше. Была высказана гипотеза, что океан, отступивший около 230 млн лет назад, оставил за собой лужи, где и обитали жгутиковые диатомеи. Они стали использовать кремнезем, тормозящий процесс старения, чтобы пережить в стадии покоя неблагоприятные условия.

Древние диатомеи потребляли так много кремнезема, что он начал осаждаться в клетках, по-видимому, сначала в виде маленьких чешуек, которые выдавливались из клеток и создавали вокруг них защитную оболочку, препятствующую обезвоживанию при высыхании мелководных водоемов» (Медлин, Симс, 2006, с. 28)

некоторые аспекты эволюции, которая у группы водорослей-гетероконтов, к которым относятся диатомеи, очень интригующая.

На сегодня считается доказанным, что хлоропласты растений, в которых происходит фотосинтез, обязаны своим происхождением эндосимбиозу: некогда клетка цианобактерии была поглощена эукариотической клеткой, но не переварилась, а стала функционировать внутри хозяина, постепенно упростившись до вида современной внутриклеточной органеллы. При этом большая часть генов эндосимбионта была перенесена в геном хозяина. Что же касается гетероконтов и, в частности, диатомовых водорослей, то предполагается, что их предки проглотили, в свою очередь, уже эукариотическую красную водоросль вместе с ее хлоропластом. Подтверждением этой теории служит наличие четырех (вместо обычных двух) мембран, окружающих хлоропласты диатомовых, а также открытие в их геноме свыше 170 генов красных водорослей (Bowler et al., 2008). Именно поэтому в геномах диатомей присутствуют гены, восходящие к участникам обоих эндосимбиозов. Кроме того, в них были обнаружены гены различных прокариот (протеобактерий, архей и др.), попавшие путем так называемого горизонтального переноса, а также большое количество уникальных генов, аналогов которым нет у других живых организмов.



Последние генетические данные свидетельствуют в пользу гипотезы, что диатомеи, наряду с другими водорослями из группы *Heterokonta*, появились около 1 млрд лет назад в результате симбиоза нефотосинтезирующего одноклеточного эукариотического организма с одноклеточной красной водорослью, чей фотосинтезирующий орган (хлоропласт) напрямую произошел от симбиотических цианобактерий

Чтобы установить историю отдельного гена, достаточно отсекуировать один лишь этот ген для определенной выборки организмов, что гораздо быстрее и дешевле секвенирования полного генома и позволяет включить в анализ гораздо больше видов. Но реконструкция сложных эволюционных событий требует изучения истории всех генов у всех представителей группы, и эту информацию могут дать только полные геномные исследования.

В нашем случае выбор объекта исследования был связан в первую очередь с тем, что *Synedra acus* является пресноводным видом. И тот факт, что она извлекает необходимое ей количество кремния даже из байкальской воды, известной своей низкой минерализацией, делает синедру идеальным кандидатом для исследования механизмов импорта этого элемента, а также других адаптаций к пресноводному образу жизни. Во-вторых, эта водоросль стала первым отсекуированным представителем крупной группы бесшовных пениатных диатомей, что открывает возможность проследить историю формирования тех или иных молекулярных механизмов и особенностей генома среди разных таксонов диатомовых.

Наша работа с геномом синедры не заканчивается публикацией результатов секвенирования. Уже получены многообещающие данные о структуре отдельных генов, участвующих в метаболизме кремния, и ведутся исследования соответствующих белков. В планах – получение транскриптома, что позволит оценить экспрессию интересующих нас генов и расширить знания об их регуляции.

Литература
Галачьянц Ю. П. и др. Определение нуклеотидной последовательности полного генома бесшовной пениатной диатомеи *Synedra acus* subsp. *Radians* из озера Байкал // Докл. РАН. 2015. Т. 461 № (3). С. 348–352.

Armbrust E. V. et al. The Genome of the Diatom *Thalassiosira pseudonana*: Ecology, Evolution and Metabolism // Science. 2004. Vol. 306 (5693). P. 79–86.

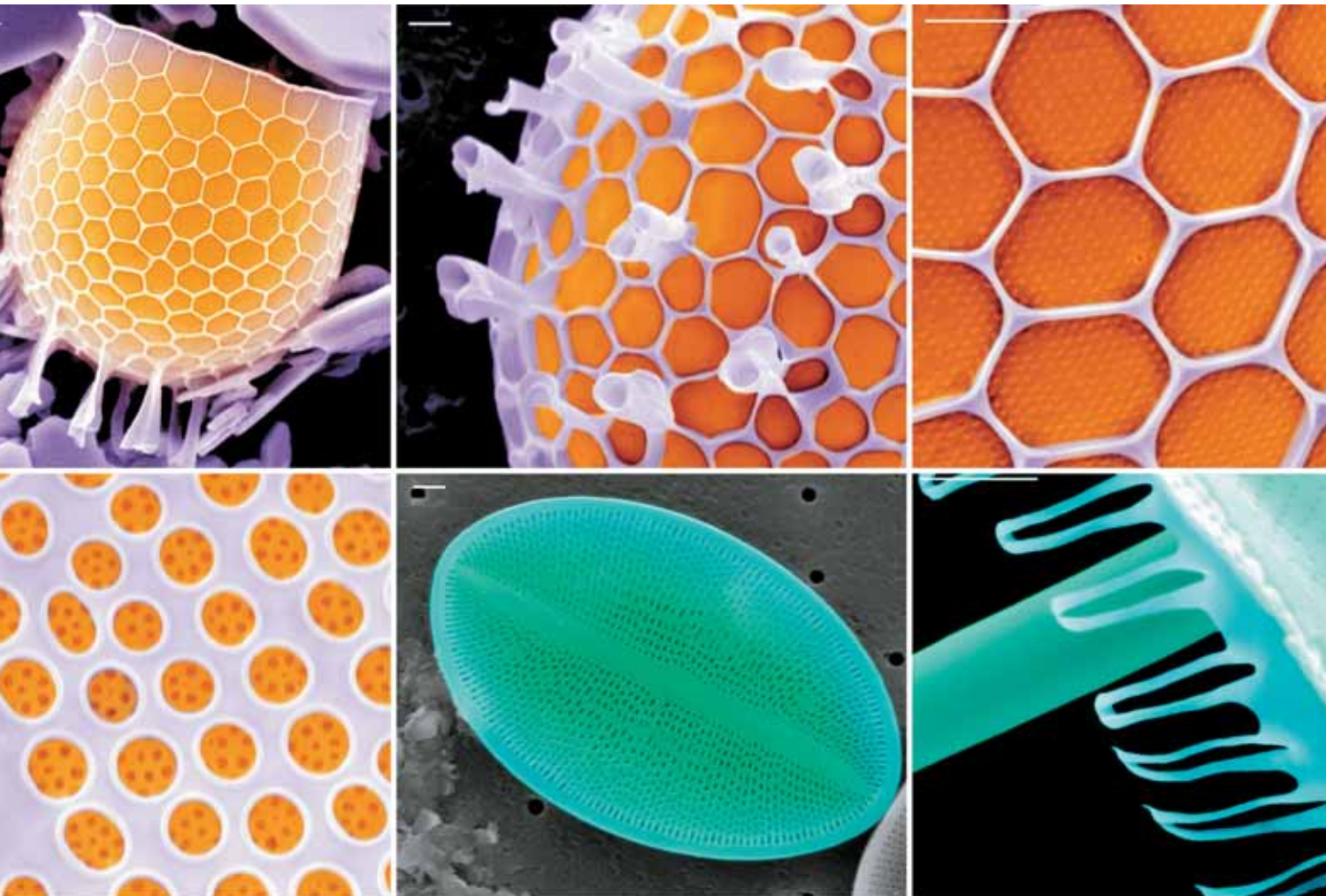
Bhattacharya D., Qui H., Price D. C. Why we need more algal genomes. // J. Phycol. 2015. Vol. 51 N. (5). P. 1–5.

Bowler C. et al. The *Phaeodactylum* genome reveals the evolutionary history of diatom genomes // Nature. 2008. 456: 239–244.

Tanaka T. et al. Oil accumulation by the Oleaginous Diatom *Fistulifera Solaris* as Revealed by the Genome and Transcriptome // The Plant Cell. 2015. Vol. 27 N. (1). P. 162–176

БЕЛКИ-ТРАНСПОРТЕРЫ КРЕМНИЯ: ДОЛГИЙ ПУТЬ К ОТКРЫТИЮ

«Единственный способ определить границы
возможного – выйти за эти границы».
Артур Кларк



Ключевые слова: Байкал, диатомовые водоросли, белки транспорта кремния, биосилификация, кластер генов.
Key words: Baikal, diatoms, silicon transporters, biosilicification, cluster of genes

Кремнеземные панцири диатомей. Сканирующий электронный микроскоп.
Масштаб: 2 мкм.
Фото К. Таматракольн, М. Хильдебранд

ПЕТРОВА Дарья Петровна – кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 18 научных работ

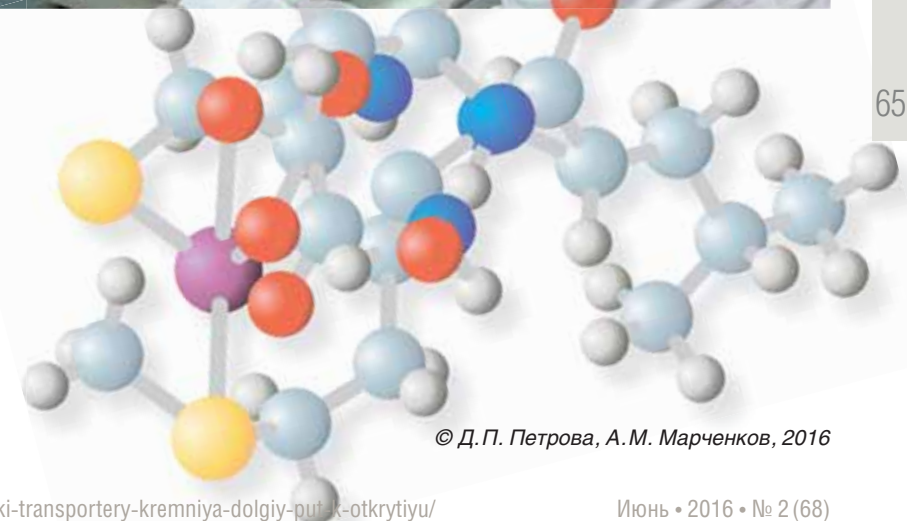


МАРЧЕНКОВ Артем Михайлович – аспирант и ведущий инженер отдела ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 2 научных работ

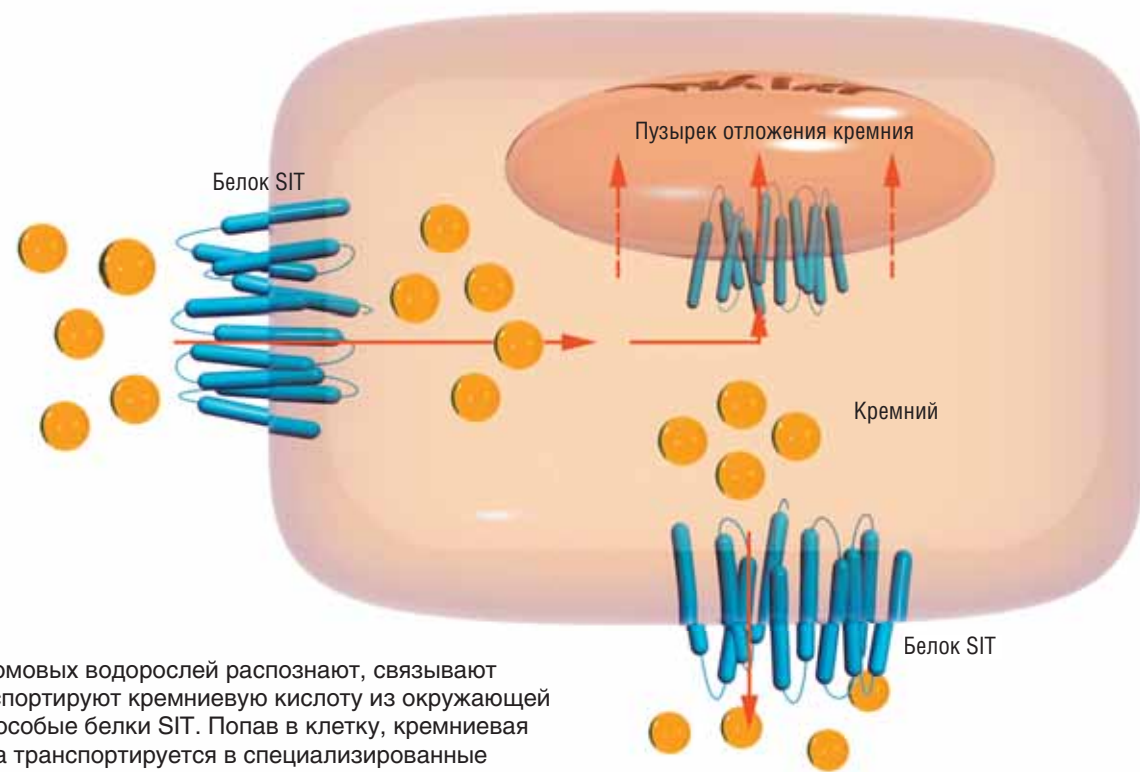
Поразительной красоты и прочности панцири диатомовых водорослей – впечатляющий пример микро- и наноструктурированного природного материала. Несмотря на то что эти удивительные микроводоросли известны еще с XVIII в., современные молекулярные биологи пока не обладают полными данными о том, как диатомеи преобразуют информацию, закодированную в геномах, в эти сложные кремнистые конструкции.

В том числе недостаточно изучены и такие базовые этапы процесса формирования элементов панциря водорослей, как захват кремниевой кислоты из окружающей среды и перенос ее в специальные органеллы, где происходит полимеризация кремния. Говоря о кремнии, мы подразумеваем, что в действительности створка диатомей построена не из кремния, а из кремнезема ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), а в клетку поступает не чистый кремний, а свободная кремниевая кислота ($\text{Si}(\text{OH})_4$).

И здесь диатомовые водоросли сталкиваются с двумя проблемами: во-первых, они должны забирать кремниевую кислоту из среды про-



© Д. П. Петрова, А. М. Марченков, 2016



У диатомовых водорослей распознают, связывают и транспортируют кремниевую кислоту из окружающей среды особые белки SIT. Попав в клетку, кремниевая кислота транспортируется в специализированные везикулы, где она полимеризуется, превращаясь в створку новой клетки, которая затем выводится из клетки наружу. По: (Thamatrakoln et al., 2006)

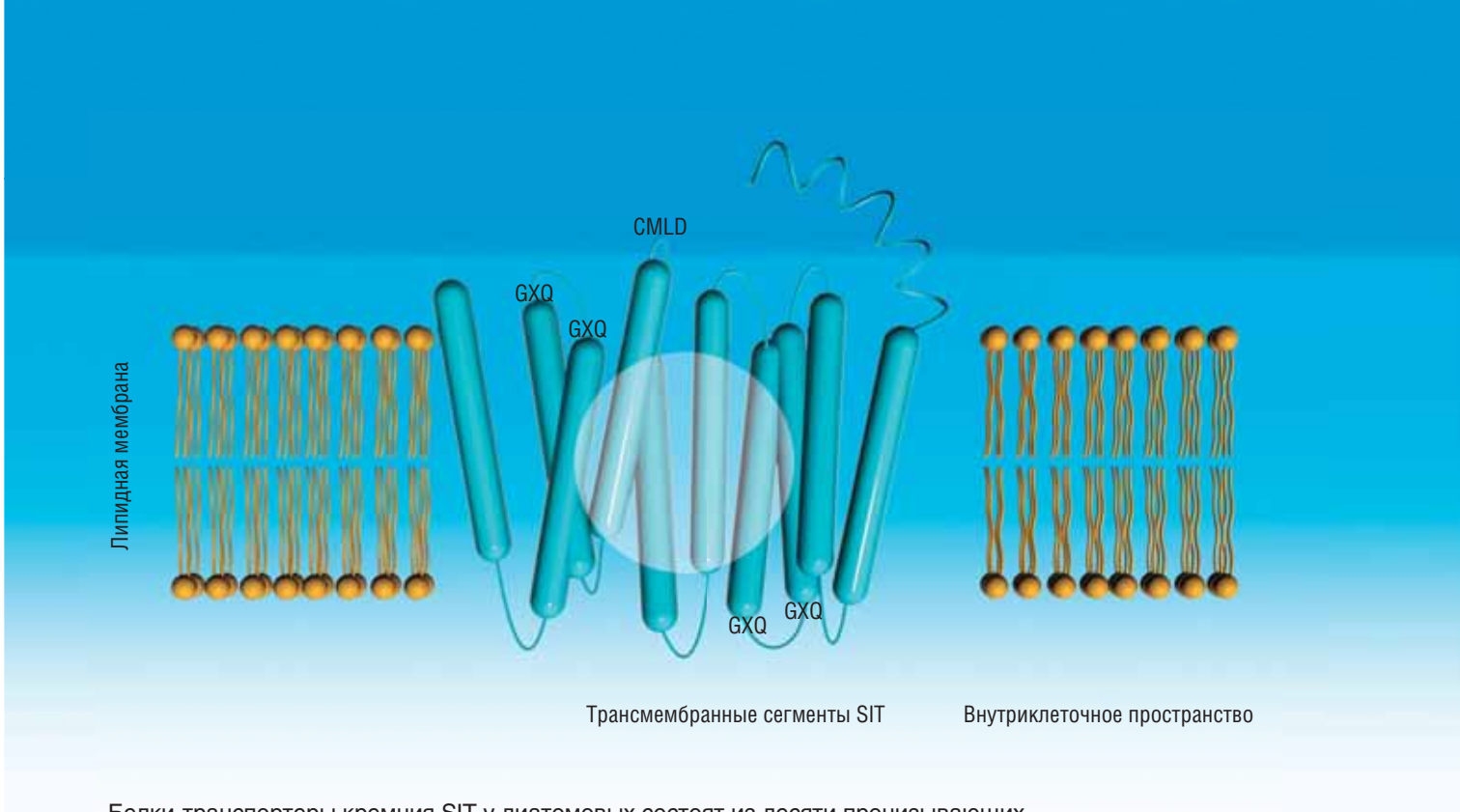
тив очень «крутого» градиента концентраций, а во-вторых, при концентрациях, превышающих 2 мМ, она начинает самопроизвольно полимеризоваться (Таматраколын, Хильдебранд, 2006). Чтобы успешно транспортировать из воды кремний, диатомеи должны связывать ее с такими органическими молекулами, как белки.

Неуловимые SIT

Первые данные о потенциальных белках-транспортерах кремния (*silicon transporters* – SITs) были опубликованы для морской диатомеи *Cylindrotheca fusiformis* в конце прошлого века (Hildebrand et al., 1997). Сотрудникам Института океанографии Скриппса Калифорнийского университета (Сан-Диего, США) удалось установить нуклеотидную последовательность пяти генов, образующих близкородственное семейство. Дальнейший анализ предсказанных аминокислотных последовательностей дал основания утверждать, что эти белки являются хорошими кандидатами на роль переносчиков кремниевой кислоты (Hildebrand et al., 1998).

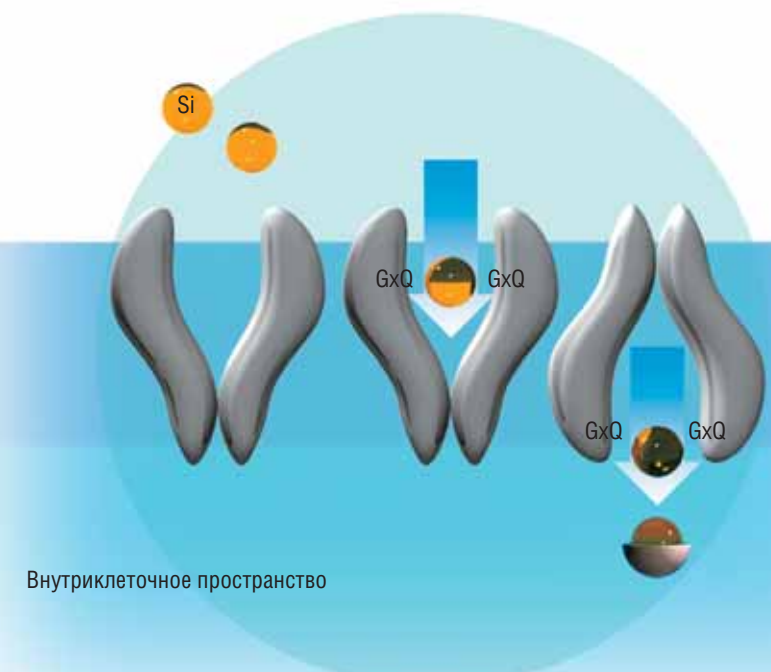
После выхода этих работ у группы ученых Лимнологического института СО РАН под руководством академика М. А. Грачева возникла идея изучить белки SIT у байкальских диатомей. В качестве основного объекта исследований был выбран обитающий в Байкале вид диатомовой водоросли рода *Synedra*, широко распространенного в пресноводных водоемах.

«Основной формой кремния в океане является кремниевая кислота (97%); остальное приходится на долю силикатов. Поскольку диатомовым водорослям, чья численность в океане очень велика, кремний жизненно необходим, именно они влияют на его концентрацию в морской воде. Согласно литературным данным, до появления диатомей и других кремнистых организмов вода в Мировом океане была просто насыщена кремнием (1,7—2,5 мМ), сегодня же его концентрация упала до 70 мкМ и ниже, а в поверхностных водах – до 1 мкМ. Концентрация же кремниевой кислоты внутри диатомовой клетки лежит в диапазоне 19—350 мМ. Таким образом, внутриклеточная концентрация кремниевой кислоты оказывается в тысячи раз выше внеклеточной!» (Таматраколын, Хильдебранд, 2006, с. 64)



Белки-транспортеры кремния SIT у диатомовых состоят из десяти пронизывающих плазматическую мембрану сегментов, соединенных гидрофильными петлями, и содержат несколько консервативных мотивов CMLD и GXQ. Белки формируют каналы для проведения кремниевой кислоты через непроницаемый для нее липидный слой мембраны. По: (Thamatrakoln et al., 2006)

Схема транспорта кремниевой кислоты через мембрану клетки диатомовой водоросли с помощью мотива GXQ: кислотный остаток связывается с глутамином (Q) мотивов GXQ, расположенных во фрагменте белковой молекулы, направленном во внешнюю среду, вызывая изменение формы белка SIT. В результате кремниевая кислота связывается с глутамином из внутриклеточной гидрофильной петли, и таким образом попадает внутрь клетки. По: (Thamatrakoln et al., 2006)



На основе сравнительного анализа аминокислотных последовательностей белков у двух видов – байкальской *S. acus* subsp. *radians* и морской *C. fusiformis*, разделенных между собой эволюционной дистанцией в несколько десятков миллионов лет, предполагалось выявить элементы, которые могли бы входить в состав активного центра этих белков. В результате внимание исследователей привлекла последовательность CMLD, представляющая собой так называемый консервативный мотив, т.е. короткую последовательность аминокислотных остатков, которая не претерпела изменений в процессе эволюции. Прилегающие к этому мотиву участки также оказались сходными у двух видов водорослей (Грачев и др., 2002). Была высказана гипотеза, что этот мотив в белках SIT связывает ион цинка, который, в свою очередь, служит акцептором кремниевой кислоты.

Позже как в ЛИН СО РАН, так и за рубежом на основе изучения генов последовательностей были получены новые данные об аминокислотных последо-

вательностях белков SIT. Их сравнительный анализ показал значительную вариабельность SIT-белков, однако их гомология при этом была столь очевидна, что могла свидетельствовать о большом давлении естественного отбора в процессе адаптации водорослей к условиям среды обитания.

Следуя гипотезе происхождения диатомовых водорослей от хризофитовых, были предприняты попытки поиска генов *sit* у водорослей из этой группы, которые увенчались успехом (Лихошвай и др., 2006). Таким образом, стало ясно, что белки-транспортёры кремния имеют очень древнюю эволюционную историю, так как диатомовые водоросли появились лишь около 240 млн лет назад, а хризофитовые – 600 млн лет назад. Наличие в белках хризофитовых мотива CMLD явилось еще одним аргументом в пользу гипотезы о его важной роли в функционировании этих загадочных белков.

В 2006 г. наши американские коллеги, продолжив работу на других видах диатомей, выдвинули гипотезу о роли в транспорте кремния других консервативных

аминокислотных мотивов – GxQ, расположенных в трансмембранных (т.е. встроенных в клеточную мембрану) доменах белков SIT. Согласно их предположению, остаток кремниевой кислоты первоначально связывается с двумя из этих последовательностей, расположенных с внешней стороны клетки. Вслед за этим белок SIT претерпевает радикальную перестройку своей третичной структуры – этот конформационный переход напоминает выворачивание зонтика, в результате чего кремниевая кислота «отрывается» от «внешних» мотивов GxQ и связывается с мотивами, расположенными уже с внутренней стороны клеточной мембраны. В итоге кремниевая кислота попадает в цитоплазму клетки.

2008 г. ознаменовался своеобразным подведением итогов исследований в области белков-транспортёров кремния: авторы двух разных гипотез независимо друг от друга обобщили весь свой полученный материал, приведя весомые аргументы в пользу той или другой гипотезы (Hildebrand, 2008; Grachev *et al.*, 2008).

Еще раз отметим, что все эти гипотезы были выдвинуты исключительно на основе информации, полученной в результате расшифровки фрагментов генов и небольшого числа полных генов, так как выделить сам белок SIT в чистом виде и провести его рентгеноструктурный анализ до сих пор не удалось. Лишь в 2007 г., спустя почти десятилетие после обнаружения генов *sit*, иркутские, а затем американские исследователи подтвердили высокочувствительным методом иммуноблоттинга реальное наличие белков SIT в протеомах нескольких видов диатомовых.

Правила умножения генов

Благодаря усилиям ученых из разных стран стало появляться все больше данных относительно структуры генов *sit* у разных видов диатомей, однако чаще всего речь шла об их отдельных фрагментах. Что касается полноразмерных генов, то информация о них была значительно расширена благодаря секвенированию геномов двух морских диатомей – *Thalassiosira pseudonana* и *Phaeodactylum tricoratum* (Armbrust *et al.*, 2004; Bowler *et al.*, 2008).

Поставив задачу секвенировать полную последовательность гена *sit* у байкальской синедры, исследователи из ЛИН СО РАН сразу столкнулись с большими трудностями. В 2007 г. с помощью полимеразной цепной реакции (ПЦР) со специфическими *праймерами* («затравками» для синтеза комплементарной цепи ДНК) и секвенирования по методу Сэнгера в генетическом материале водоросли удалось идентифицировать протяженную последовательность этого гена, однако его стартовый *кодон* – тройка нуклеотидов,

с которой начинается процесс синтеза белка в рибосоме, так и не был обнаружен. Вопрос о «прочтении» полного гена *sit* у байкальской диатомеи несколько лет оставался открытым.

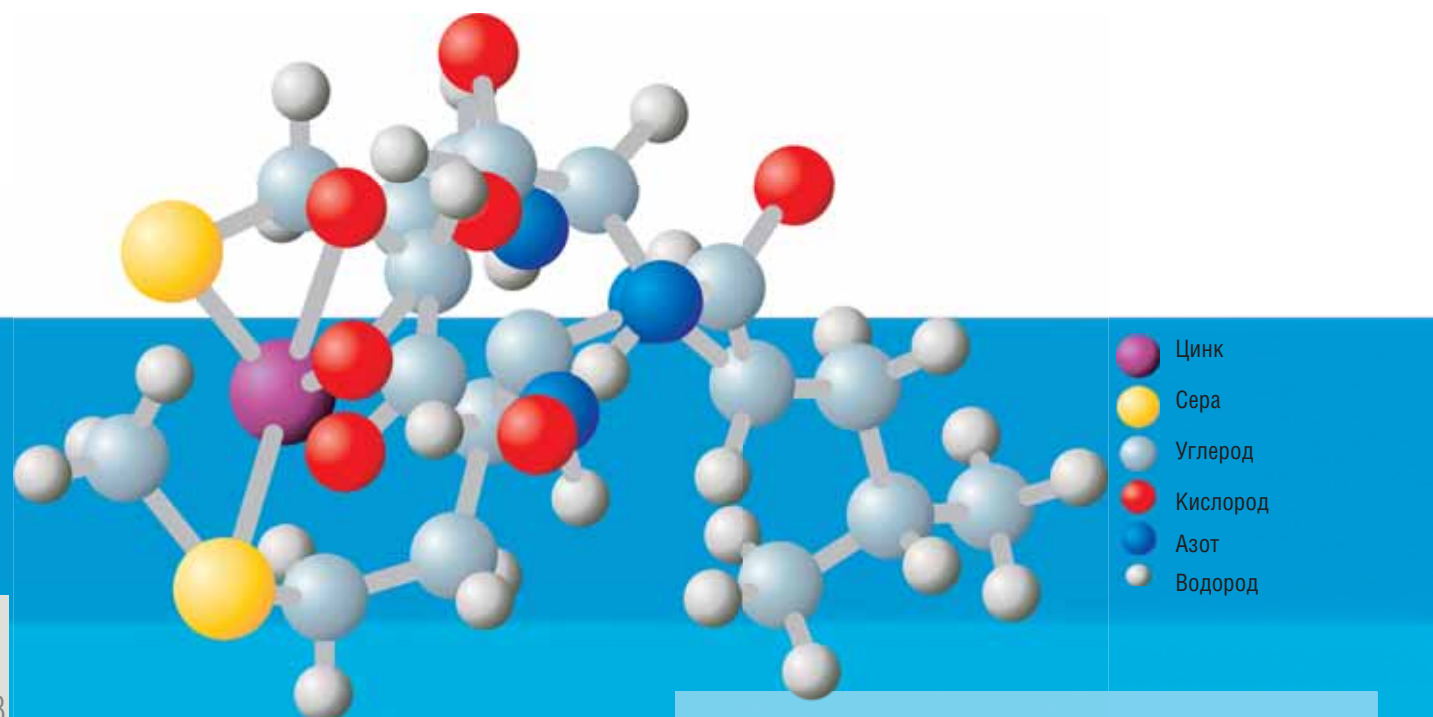
Большое значение в дальнейшем поиске сыграли новый метод культивирования водорослей, «чистых» от бактерий и других одноклеточных (Shishlyannikov *et al.*, 2011) и проект расшифровки полного генома *S. acus* subsp. *radians* с использованием методов массового параллельного секвенирования, стартовавший в ЛИН СО РАН в 2008 г. Так как благодаря результатам секвенирования других видов диатомовых уже было известно о наличии у них сразу нескольких генов *sit*, этот проект открыл возможность «разобраться» как с числом и структурой искомым генов, так и их местоположением в геноме (кстати сказать, больше половины из известных на сегодня полных последовательностей генов *sit* были получены благодаря «прочтению» именно полных геномов).

В рамках этого проекта совместно с сотрудниками московского Центра «Биоинженерия» РАН достаточно быстро удалось «собрать» полные геномы митохондрий и хлоропластов синедры (Ravin *et al.*, 2010; Galachyants *et al.*, 2012), однако ген *sit* все еще оставался неуловимым. Наконец, в 2012 г. при анализе данных предварительной сборки полного генома *S. acus* subsp. *radians* был найден участок, где располагалась нуклеотидная последовательность, имевшая лишь точечные отличия от ранее обнаруженной генной структуры. Эта последовательность ДНК кодировала полипептид, содержащий все характерные для белка SIT консервативные элементы, а также имеющий стартовый остаток метионина в начале последовательности.

Таким образом, появились все основания говорить об открытии первого полноразмерного гена *sit* у представителя байкальских диатомовых, что было подтверждено в совместной работе с к.х.н. А.А. Бондарем из ЦКП «Геномика» СО РАН (Новосибирск).

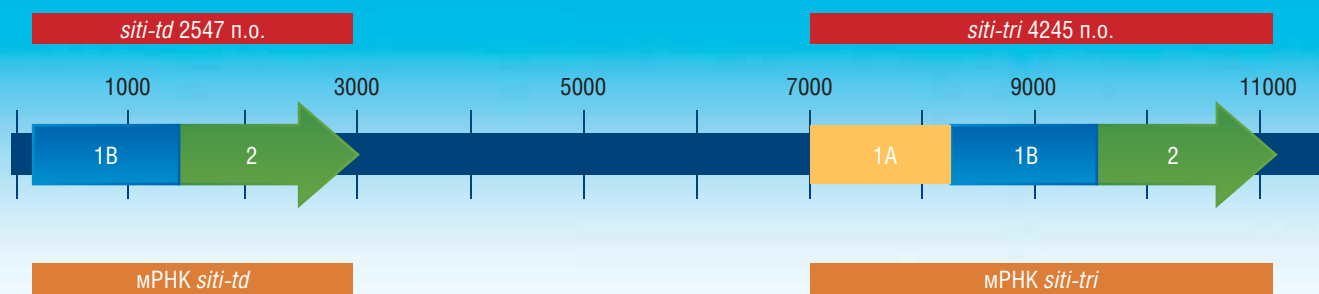
В конечном счете удалось выяснить, что кластер генов *sit* у синедры состоит из двух неожиданно «длинных» генов, расположенных в одном участке хромосомы, – «удвоенного» *sit-td* и «утроенного» *sit-tri*, длина которых почти в 2 и 3 раза, соответственно, превышает длину всех известных полноразмерных генов семейства *sit*. В хромосоме эти гены разделены расстоянием в несколько тысяч пар нуклеотидов. Каждый из них кодирует, соответственно, 2 и 3 функциональные белковые единицы SIT, содержащие все их специфические консервативные элементы.

Открытие генов *sit* у байкальской синедры породило и новые загадки: судя по результатам вышеупомянутых иммунохимических исследований, белки SIT у этой водоросли имеют массу около 66 кДа, но исходя



Так выглядит вероятная структура комплекса мотива CMLD белка транспорта кремния SIT с ионом цинка у диатомовых водорослей. По: (Grachev *et al.*, 2005). Рис. В. Аненкова (ЛИН СО РАН, Иркутск)

Ученые предложили два альтернативных механизма взаимодействия кремниевой кислоты с SIT. Согласно первому из них, кислота связывается с ионом цинка в активном центре консервативного мотива CMLD, который найден не только у большинства диатомей, но и у более древних хризофитовых (Лихошвай и др., 2006). Вторая модель взаимодействия основана на изменении конформации самого белка-транспортёра, за которую отвечают консервативные мотивы GxQ, расположенные в четырех разных районах белковой молекулы (Thamatrakoln *et al.*, 2006)



из расшифрованных геновых последовательностей, их масса должна была превышать 92 и 110 кДа. Чтобы проверить, не являются ли найденные гены «псевдогенами» (не транслируемыми), а также определить длину считываемой с генов матричной РНК, была получена суммарная РНК клеток водоросли, а на ее основе – «библиотека» комплементарной ДНК.

Оказалось, что в клетках байкальской синедры действительно присутствуют «длинные» мРНК, последовательности которых точно соответствуют обнаруженным генам. Эта находка означает, что там теоретически могли бы находиться и белки с очень большой молекулярной массой, чего в реальности не наблюдается. Однако ответа на вопрос, как и на каком этапе трансляции генетической информации происходит «укорочение» мРНК и формирование белков «обычной» длины, пока нет.

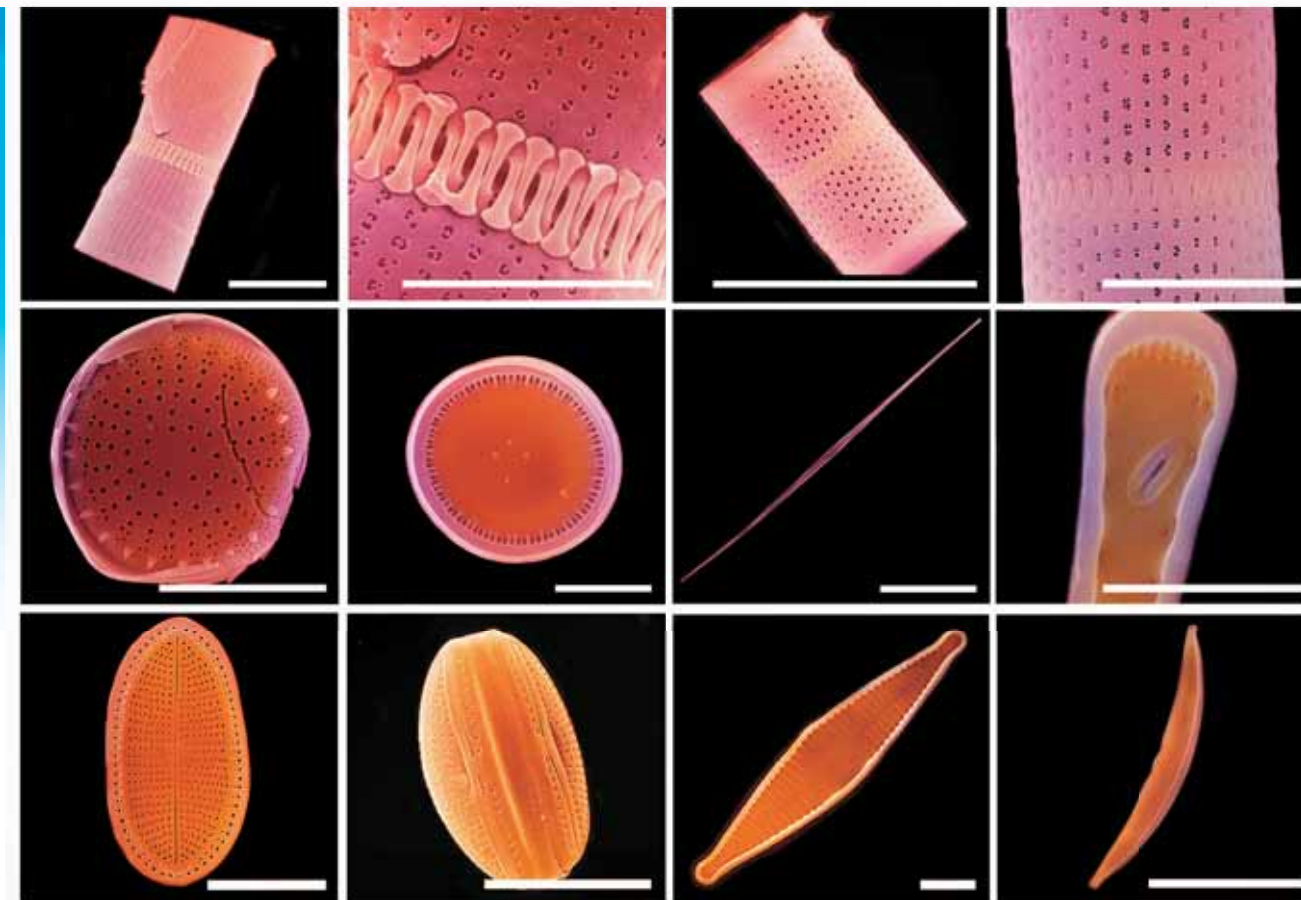
К 2015 г. в мире было идентифицировано лишь 15 полных последовательностей генов, кодирующих белки транспорта кремния, для шести видов морских диатомовых водорослей. Спустя 13 лет после начала в нашей стране подобных работ удалось открыть и characterize первые полноразмерные гены *sit*, принадлежащие пресноводному представителю диатомей.

Обнаруженный у байкальской *S. acus* subsp. *radians* кластер генов *sit* в виде «тандем+триплет» не встречался ни у одной из уже исследованных диатомей, для которых характерно наличие 3–5 отдельных генов *sit* «обычной» длины. Особый интерес вызывает тот факт, что «нестандартные» гены были обнаружены у вида, обитающего в пресноводном озере, что может быть связано с приспособлением к новым условиям обитания.

Как показали исследования иркутских лимнологов, кластер генов *sit* у байкальской диатомовой водоросли *S. acus* subsp. *radians* состоит из двух генов разной длины, разделенных промежутком. Оба гена имеют один одинаковый фрагмент («1В+2»), при этом более длинный ген представляет собой, по сути, копию первого гена+дополнительный участок: «1А+1В+2». Фрагменты «1А» и «1В» очень сходны между собой, но отличаются от фрагмента «2». Такая сложность структуры была одним из камней преткновения для секвенирования, особенно на этапе поиска соответствующей матричной РНК, так в этом случае невозможно было определить, с одним или двумя генами имеет дело исследователь. Поэтому для работы с пулом комплементарной ДНК, полученной с библиотеки мРНК потребовалось определить точки начала транскрипции («считывания») как для более длинного гена *sit-tri*, так и для одинакового фрагмента «1В+2»

Анализ структурной организации генов, кодирующих белки транспорта кремния у диатомей и других кремний-зависимых организмов, позволит понять, каким образом шла эволюция этих уникальных белков. Без них одноклеточные водные организмы не смогли бы использовать «вредный» кремний окружающей среды для «полезного» строительства защитных панцирей и опорных прочных элементов экзоскелета. Новые организмы, которые появились благодаря белкам-транспортерам и активно эволюционировали, изменили биосферу нашей планеты.

Работа поддержана программой Президиума РАН «Молекулярная и клеточная биология»



Строение панцирей диатомовых водорослей. Сканирующая электронная микроскопия. Фото М. Башенхаевой

Литература

- Грачев М.А., Деникина Н.Н., Беликов С.И. и др. Элементы активного центра белков транспорта кремниевой кислоты в диатомовых водорослях // Молекуляр. биология. 2002. Т. 36, № 4. С. 379–681.
- Лихошвай Е.В., Масюкова Ю.А., Шербакова Т.А., и др. Обнаружение гена транспорта кремниевой кислоты у хризофитовых водорослей // Докл. РАН. 2006. Т. 408. С. 845–849.
- Armbrust E. V., Berges J. A., Bowler C. et al. The genome of the diatom *Thalassiosira pseudonana*: ecology, evolution, and metabolism // Science. 2004. V. 306. P. 79–86.
- Bowler C., Allen A. E., Badger J. H. et al. The *Phaeodactylum* genome reveals the evolutionary history of diatom genomes // Nature. 2008. V. 456. P. 239–244.
- Galachyants Y. P., Morozov A. A., Mardanov A. V. et al. Complete Chloroplast Genome Sequence of Freshwater Araphid Pennate Diatom Alga *Synedra acus* from Lake Baikal // Intern. J. of Biol. 2012. V. 4(1). P. 27–35.
- Grachev M. A., Annenkov V. V., Likhoshway Ye. V. Silicon nanotechnologies of pigmented heterokonts // BioEssays. 2008.

V. 30. P. 328–337.

Grachev M., Sherbakova T., Masyukova Yu. et al. A potential Zinc-binding motif in silicic acid transport proteins of diatoms // Diatom Res. 2005. V. 20, N 2. P. 409–411.

Hildebrand M., Volcani B. E., Gassmann W. et al. A gene family of silicon transporters // Nature. 1997. V. 385. P. 688–689.

Hildebrand M., Dahlin K., Volcani B. E. Characterization of a silicon transporter gene family in *Cylindrotheca fusiformis*: sequences, expression analysis, and identification of homologs in other diatoms // Mol. Gen. Genet. 1998. V. 260. P. 480–486.

Hildebrand M. Diatoms, Biomineralization Processes, and Genomics // Chem. Rev. 2008. V. 108, N. 11. P. 4855–4874.

Ravin N. V., Galachyants Y. P., Mardanov A. V. et al. Complete sequence of the mitochondrial genome of a diatom alga *Synedra acus* and comparative analysis of diatom mitochondrial genomes // Curr. Genet. 2010. V. 56(3). P. 215–223.

Shishlyannikov S. M., Zakharova Y. R., Volokitina N. A. et al. A procedure for establishing an axenic culture of the diatom *Synedra acus* subsp. *radians* (Kütz.) Skabibitsch. from Lake Baikal // Limnol. Oceanogr.: Methods. 2011. V. 9. P. 478–484.

И. Ю. ЗАЙДЫКОВ

Крохотный веслоногий рачок – байкальская эпишура – один из самых знаменитых байкальских эндемиков. Этот доминирующий вид зоопланктона Байкала является важнейшей частью пищевой пирамиды пресноводного «океана». Он питается бактериями и одноклеточными водорослями, а сам служит кормом байкальскому омулю и другим пелагическим рыбам. За сутки рачок способен профильтровать около одного стакана воды, участвуя тем самым в очищении байкальских вод. Но для исследователей это водное беспозвоночное интересно и само по себе: в его биологии и экологии остается еще много загадочного – от прочных кремниевых «зубов» до видообразования



ЗАЧЕМ ЧИСТИЛЬЩИКУ Байкала ЗУБНЫЕ КОРОНКИ

Эпишура в поле зрения светового микроскопа



ЗАЙДЫКОВ Игорь Юрьевич – ведущий инженер лаборатории ихтиологии Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор 5 научных работ

Байкальская эпишура (*Epischura baicalensis*) – это планктонный организм (от греч. planktos – «парящий, блуждающий»), обитающий в водной толще озера. Как и большинство планктонных организмов, он имеет сравнительно небольшие (около 1,5 мм) размеры и практически прозрачен. Питается также планктоном, только фотосинтезирующим (мелкими одноклеточными водорослями), а также бактериями.

Свою пищу эпишура добывает, используя целый комплекс ротовых конечностей, создающих ток воды, из которого рачок и вылавливает съедобные объекты. Процесс питания в принципе не отличается от такового у других веслоногих. Тем не менее многие стороны жизни этого представителя древнейшей группы членистоногих остаются малоизвестными для ученых. О пищевой «разборчивости» эпишуры уже писали ранее (Мельник, 2004), сегодня же речь пойдет о методах исследования этого водного ракообразного и наиболее интересных новых результатах, касающихся популяционных характеристик и строения его ротового аппарата.

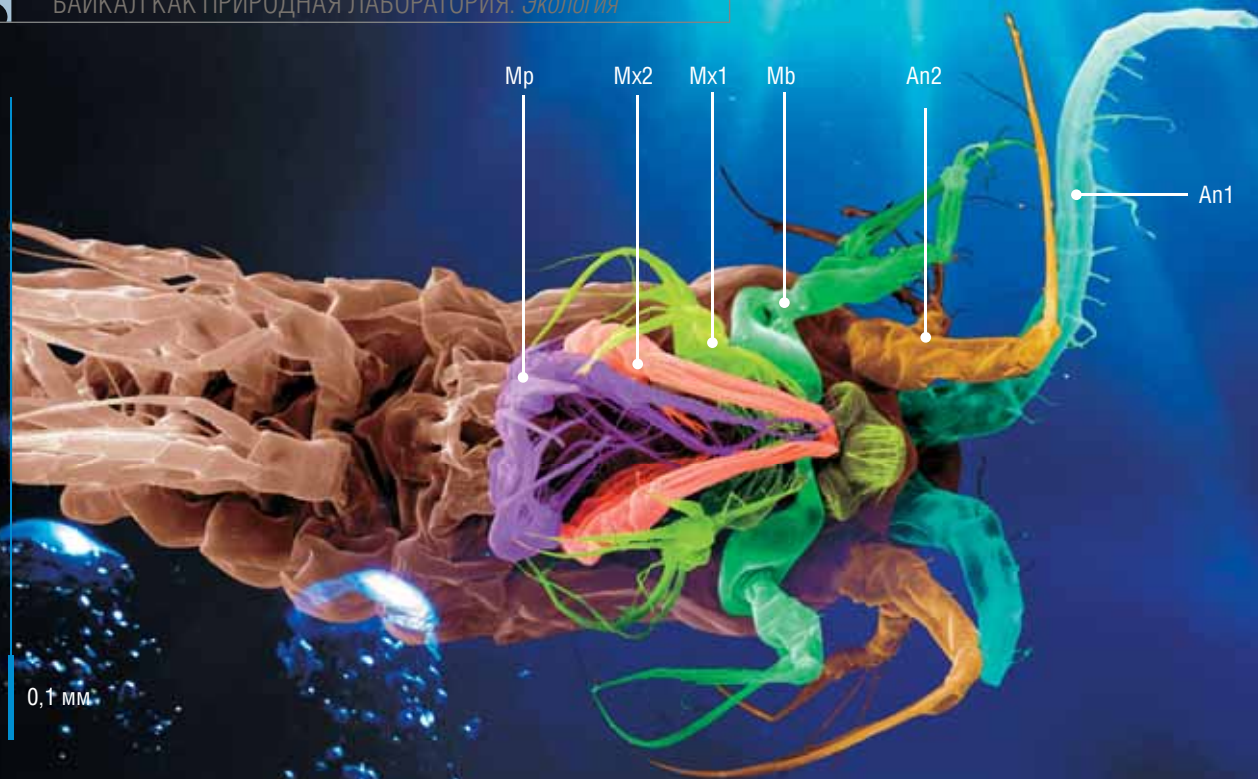
Ловись планктон, большой и маленький

Чтобы получить достаточное количество особей для исследования, причем собранных не в одной точке акватории, на корабле должно быть специальное оборудование: электролебедка с возможностью регулировать скорость движения троса, специальные планктонные сети и т. п.

Ключевые слова: зоопланктон, веслоногие ракообразные, эпишура, отбор планктонных проб, методы исследования, озеро Байкал.

Key words: zooplankton, Copepoda, Epischura, samples of plankton, research methods, Lake Baikal

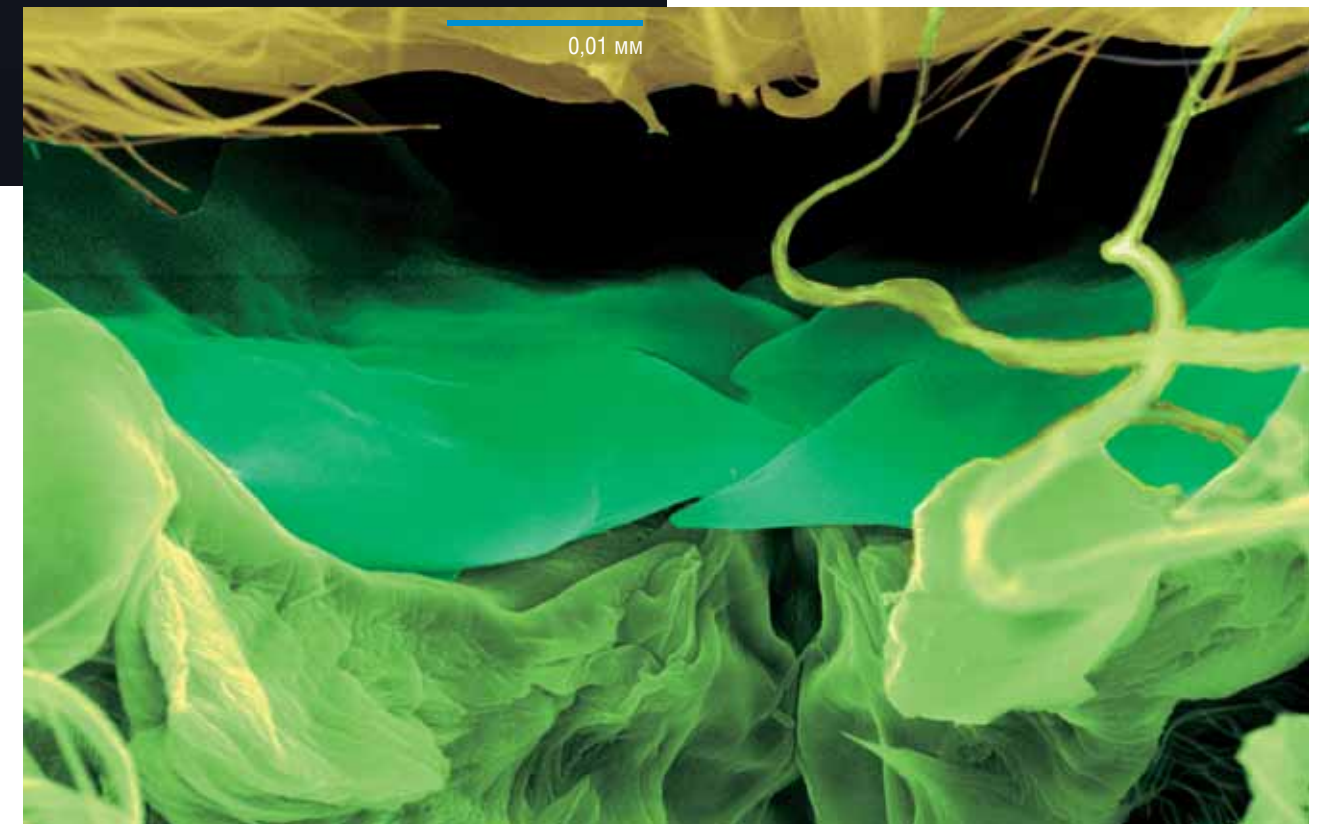
© И. Ю. Зайдыков, 2016



Байкальский рачок эпишура (*E. baicalensis*). Цветами обозначены разные группы ротовых конечностей: An1 – первые антенны; An2 – вторые антенны; Mb – мандибулы; Mx1 – первые максиллы; Mx2 – вторые максиллы; Mр – максиллипеды. Сканирующая электронная микроскопия

Род *Epischura* относится к свободноживущим веслоногим ракообразным подкласса *Copepoda*. Представители этого рода встречаются в пресных водоемах Азии и Северной Америки, в том числе в Великих Американских озерах, на Дальнем Востоке в бассейне р. Амур и, наконец, в самом глубоком и древнем озере планеты – Байкале. Доля эпишуры в озере Байкал составляет около 80% от числа всех ракообразных, а общая биомасса в озере, в зависимости от года и сезона, составляет от 60 до 950 тыс. т. Питается эпишура, отфильтровывая пищу из воды с помощью нескольких пар ротовых конечностей, которые создают ток воды и одновременно образуют что-то наподобие фильтровальной сети, улавливающей нужные ей частицы. За сутки рачок способен профильтровать около одного стакана воды, участвуя тем самым в очищении байкальских вод. Питается байкальская эпишура бактериями и одноклеточными водорослями, среди которых преобладают диатомовые, сама же служит пищей как для других ракообразных (циклопы, макрогектопус), так и для всех пелагических рыб (омуль, голомянка, желтокрылка и др). Таким образом, эпишура является важнейшим звеном в цепи передачи энергии от фитопланктона к хищным представителям зоопланктона и рыбам

Режущие края мандибул *E. baicalensis*, плотно смыкаемые для измельчения пищи



сеть, как правило, не опускают. Хотя пробы с глубины до 700 м периодически берутся.

Ветер на Байкале – частое явление, и при температуре воды около 4 °С, как это бывает в начале экспедиционного сезона, в таком деле не обойтись без хорошего зимнего пуховика, шапки и теплых непромокаемых штанов.

Почему у вас такие большие зубы?

Одной из задач нашего исследования являлось изучение ротовых конечностей эпишуры с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Подобные исследования проводились и раньше, но с помощью методов световой микроскопии. Однако благодаря большей разрешающей способности электронного микроскопа нам удалось не только уточнить уже имеющиеся данные, но и обнаружить новые факты.

Среди одноклеточных водорослей, которые входят в рацион байкальской эпишуры, важнейшее место занимают диатомовые водоросли – одноклеточные фотосинтезирующие организмы, покрытые причудливым «панцирем» из диоксида кремния. Чтобы раскусить такую оболочку, нужно иметь крепкие зубы, и они у эпишуры есть. Точнее на одном из зубцов челюстей (мандибул) у нее есть специальная коронка.

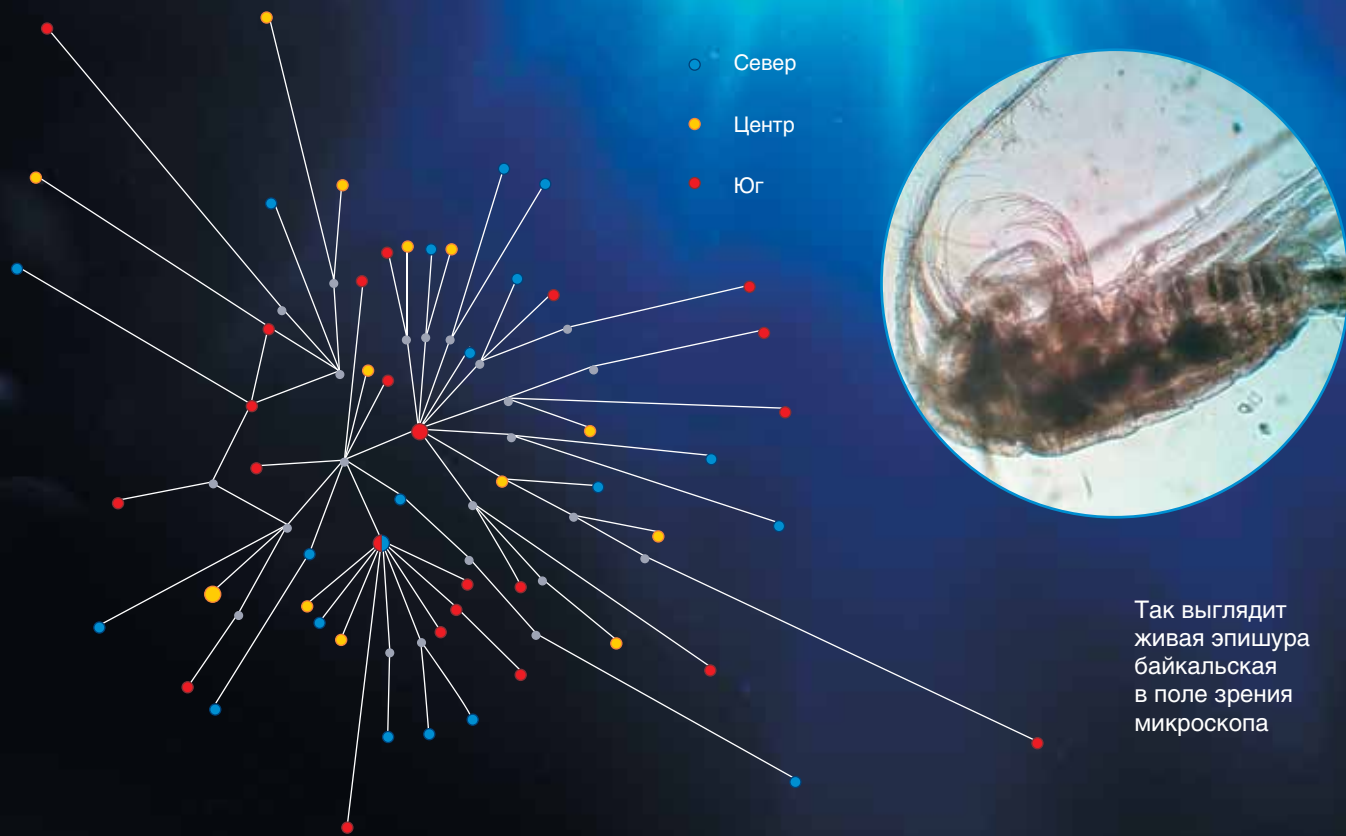
Судоходный сезон для флота Лимнологического института СО РАН открывается на Байкале в конце мая, когда только-только сходит лед. Как правило, все начинается с комплексных экспедиций, когда на одном корабле идут химики, физики и биологи. У каждого из нас – свои задачи, моя – отбор проб зоопланктона для себя и других исследователей. Делается это с помощью зоопланктонных сетей, в частности, сетью Джеди и ДжОМ (это более крупная океаническая модель сети Джеди), к которым крепится груз 8–15 кг (чем больше сеть, тем больше груз).

Сети крепятся к тросу лебедки и опускаются на нужную глубину, а затем поднимаются с определенной скоростью (около 1 м/с). Если поднимать планктонную сеть слишком быстро, вода не будет успевать проходить через мелкие отверстия фильтрующей части сети и обратным током начнет выбрасывать то, что должно быть поймано. Если же поднимать слишком медленно, отлавливаемые организмы, почуяв неладное, успеют «разбежаться» в разные стороны. Необходимо сле-

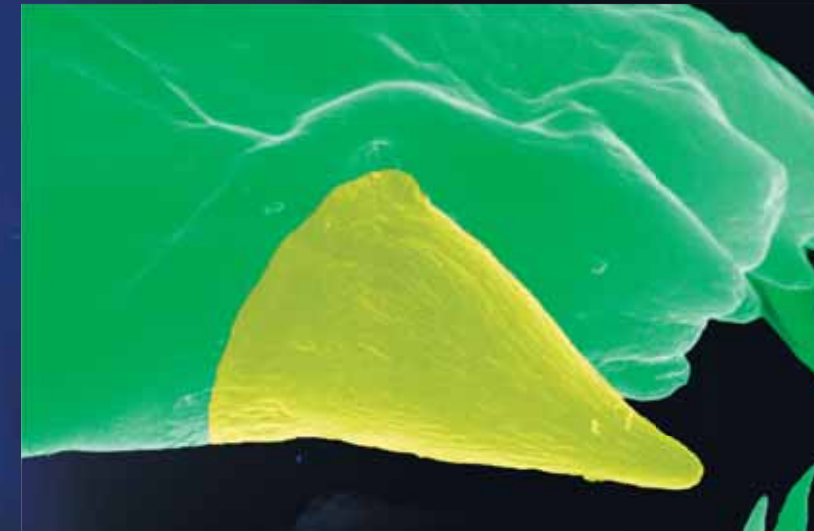
дить не только за скоростью подъема сети, но и за тем, куда ее сносит: при выходе из воды ее может затянуть под корабль, где в придачу к своему улову она соберет еще грязь и нарастания с днища корабля или вообще оторвется.

В некоторых случаях важен и угол наклона сети, при котором она выходит из воды. Когда нужно взять пробу с конкретных глубин, используется специальное устройство – «замыкатель», который закрывает сеть на нужной глубине при помощи посыльного груза, прекратив дальнейшую фильтрацию. При этом сеть не останавливается, и исследователь должен рассчитать, исходя из скорости подъема сети и скорости опускания посыльного груза, глубину, где они встретятся и сеть закроется.

Отбор планктонных проб занимает от 10–15 минут до нескольких часов в зависимости от числа проб на конкретной точке и глубин, на которые нужно опустить сеть. Байкал, как известно, самое глубокое озеро в мире, но на все полторы с лишним тысячи метров



Так выглядит живая эпишура байкальская в поле зрения микроскопа



0,01 мм

Мандибулярный зубец *E. baicalensis*, желтым цветом обозначена кремниевая коронка

Режущий край мандибулы *E. baicalensis*, кружком показан зуб с обломившейся кремниевой коронкой

0,01 мм

Морфологическая часть работы выполнена в рамках проекта «Исследование генетических, молекулярных, эволюционных и экологических аспектов представителей царства Chromista как основных продуцентов биогенного кремнезема и участников круговорота биогенных элементов водных экосистем» (VI.50.1.3, № 0345-2014-0009), генетическая – «Молекулярная экология и эволюция живых систем Центральной Азии на примере рыб, губок и ассоциированной с ними микрофлоры» (VI.50.1.4 № 0345-2014-0002)

С помощью специального зонда на СЭМ QUANTA 200 фирмы FEI удалось обнаружить, что в состав этих прочных зубных коронок входит кремний. Кроме того, выяснилось, что когда они «стачиваются» или обламываются со временем, на их месте вырастают новые. Аналогичные кремниевые коронки были обнаружены и у других видов эпишуры, различалось лишь содержание кремния. Оказалось, что последнее связано с диетой, а точнее – с толщиной и прочностью панцирей диатомовых водорослей, которыми питаются рачки (Naumova *et al.*, 2015).

Структуры, содержащие кремний, – редкое явление у животных: чаще в них присутствует более доступный кальций. У разных видов эпишуры можно наблюдать, как особи утрачивают кремний, если начинают питаться водорослями с менее прочной оболочкой или другими планктонными организмами.

Единая и неделимая

Следующий вопрос, которым мы занялись, – представляет ли эпишура в Байкале одну большую популяцию, или же она распадается на отдельные изолированные или почти изолированные группы?

В поисках ответа было проведено сравнение фрагментов митохондриального гена, кодирующего первую субъединицу одного из ферментов – цитохром оксида-

зы (COI), взятых у особей эпишуры из разных участков озера. Митохондриальную ДНК выделяли из плавательных ног рачков, чтобы по возможности сохранить тело исследуемых особей целым для дополнительных морфологических исследований.

После проведения стандартной полимеразной цепной реакции (ПЦР) и расшифровки первичной структуры ДНК полученные нуклеотидные последовательности сравнили между собой и на этой основе построили так называемые «деревья гаплотипов». Гаплотип – это уникальная совокупность сцепленных генетически локусов, а дерево гаплотипов объединяет идентичные последовательности ДНК в «родственные» группы.

Как известно, изменения (замены) в структуре ДНК накапливаются постепенно, и чем меньше таких замен у сравниваемых организмов, тем они ближе к общему предку на «родословном древе». Соответственно,

если бы популяции эпишуры в разных частях Байкала жили и развивались самостоятельно в условиях изоляции, это обязательно отразилось бы на характере пространственного размещения групп и групповых скоплений разных гаплотипов. Однако результаты анализа митохондриальных генов продемонстрировали совсем другую ситуацию: оказалось, что вся байкальская эпишура представлена в озере одной-единственной огромной популяцией (Зайдыков и др., 2015).

Исследования крошечного, практически невидимого глазу эндемичного веслоного рачка дали интересные фундаментальные результаты. Во-первых, у этого обитателя планктонной толщи обнаружили крепкие кремневые «зубы» – редкость в животном мире.

Во-вторых, напомним, что Байкал имеет протяженность более 600 км, его ширина в некоторых местах достигает почти 80 км, а поднятиями дна озеро разделено на три большие котловины. Все это долгое время давало повод сомневаться в том, что маленький рачок может иметь единую популяцию на всем этом гигантском пространстве – в масштабах эпишуры просто космическом! Оказалось, может. И когда удастся разобраться в причинах этого явления, мы, возможно, еще немного приблизимся к пониманию того, как происходит видообразование на Земле.

Литература

Мельник Н. Г. Ракообразные байкальских вод // Наука из первых рук. 2004. Т. 3. № 2. С

Шумный В. К. Природа была первым гениальным инженером // Наука из первых рук. 2004. Т. 3. № 2. С. 96–101.

Зайдыков И. Ю., Майор Т. Ю., Суханова Л. В. и др. Полиморфизм мтДНК эпишуры озера Байкал – ключевого эндемичного вида планктонного сообщества // Генетика. 2015. Т. 51. № 9. С. 1087–1090.

Naumova E. Yu., Zaidykov I. Yu., Tauson V. L., Likhoshway Ye. V. Features of the fine structure and Si content of the mandibular gnathobase of four freshwater species of *Epischnura* (Copepoda: Calanoida) // Journal of Crustacean Biol. 2015. V. 35. Iss. 6. P. 741–746.

В публикации использованы фото автора

Ю.М. ЗВЕРЕВА

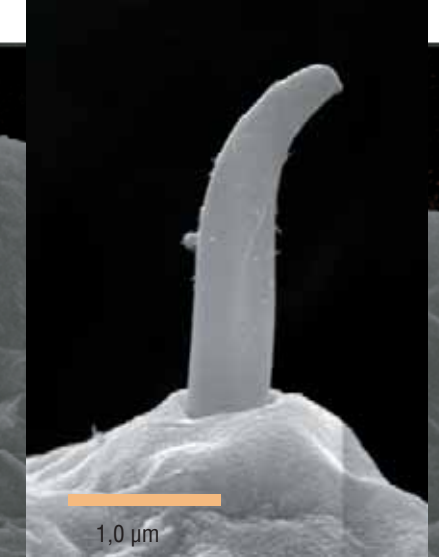


Заплесковая зона озера Байкал – типичное местообитание *M. bungei*.
Фото О.А. Тимошкина

ЧЕМ ДЫШАТ БАЙКАЛЬСКИЕ ЧЕРВИ?

Малощетинковые черви, или олигохеты (от лат. *Oligochaeta*), – небольшие сегментированные мягкотелые животные-гермафродиты. В отличие от своих родственников, полихет, подавляющее большинство которых живет в воде, олигохеты заселяют всевозможные биотопы: моря, реки, озера, почву, переходные зоны между водой и почвой, некоторые виды олигохет найдены даже в пещерах и на ледниках. Живут олигохеты и в Байкале – от уреза воды и до самых больших глубин. В одном Байкале видовое разнообразие малощетинковых червей больше, чем во всех пресноводных водоемах России: на данный момент описано более 200 видов олигохет, обитающих в озере (Семерной, 2004). Нужно подчеркнуть, что более 80% этих видов являются эндемиками, т.е. не встречаются больше нигде в мире. Один из них, *M. bungei*, стал объектом пристального внимания молодых исследователей из Лимнологического института

Класс олигохет насчитывает, по разным данным, не менее пяти тысяч известных на сегодняшний день видов, распространившихся по всем континентам, кроме Антарктиды. Далеко ходить не надо, буквально под нашими ногами после дождя ползают хорошо знакомые всем дождевые черви. В Австралии же обитает самый крупный дождевой червь в мире – *Megascolex australis*, который может достигать 3 м в длину (Буруковский, 2010). А вот на ледниках не каждый червь выживет: там живут так называемые ледяные черви, *Mesenchytraeus solifugus*, из семейства энхитреид (Shain *et al.*, 2010)



Щетинка *M. bungei*. Сканирующая электронная микроскопия

M. bungei, как и его родственник *M. solifugus*, неплохо переносит холод, что подтверждает один из наших экспериментов (Зверева, 2012). Черви этого вида, будучи полностью замороженными в лед, спустя некоторое время, когда лед растаял, сохранили свою жизнеспособность

ЗВЕРЕВА Юлия Михайловна – ведущий инженер лаборатории биологии водных беспозвоночных Лимнологического института СО РАН. Автор и соавтор 16 научных работ

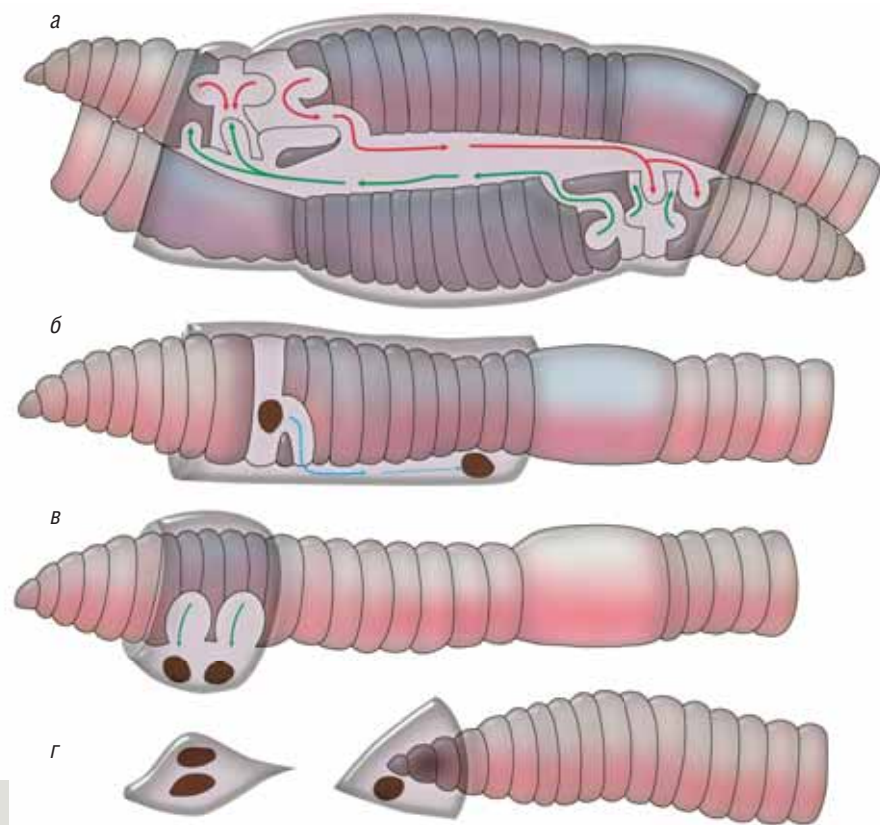


Ключевые слова: олигохеты, *Oligochaeta*, Байкал, *Mesenchytraeus bungei*, дыхание, питание.
Key words: oligochaeta, Lake Baikal, *Mesenchytraeus bungei*, oxygen uptake, feeding

© Ю.М. Зверева, 2016

Половая система – «лицо» червя

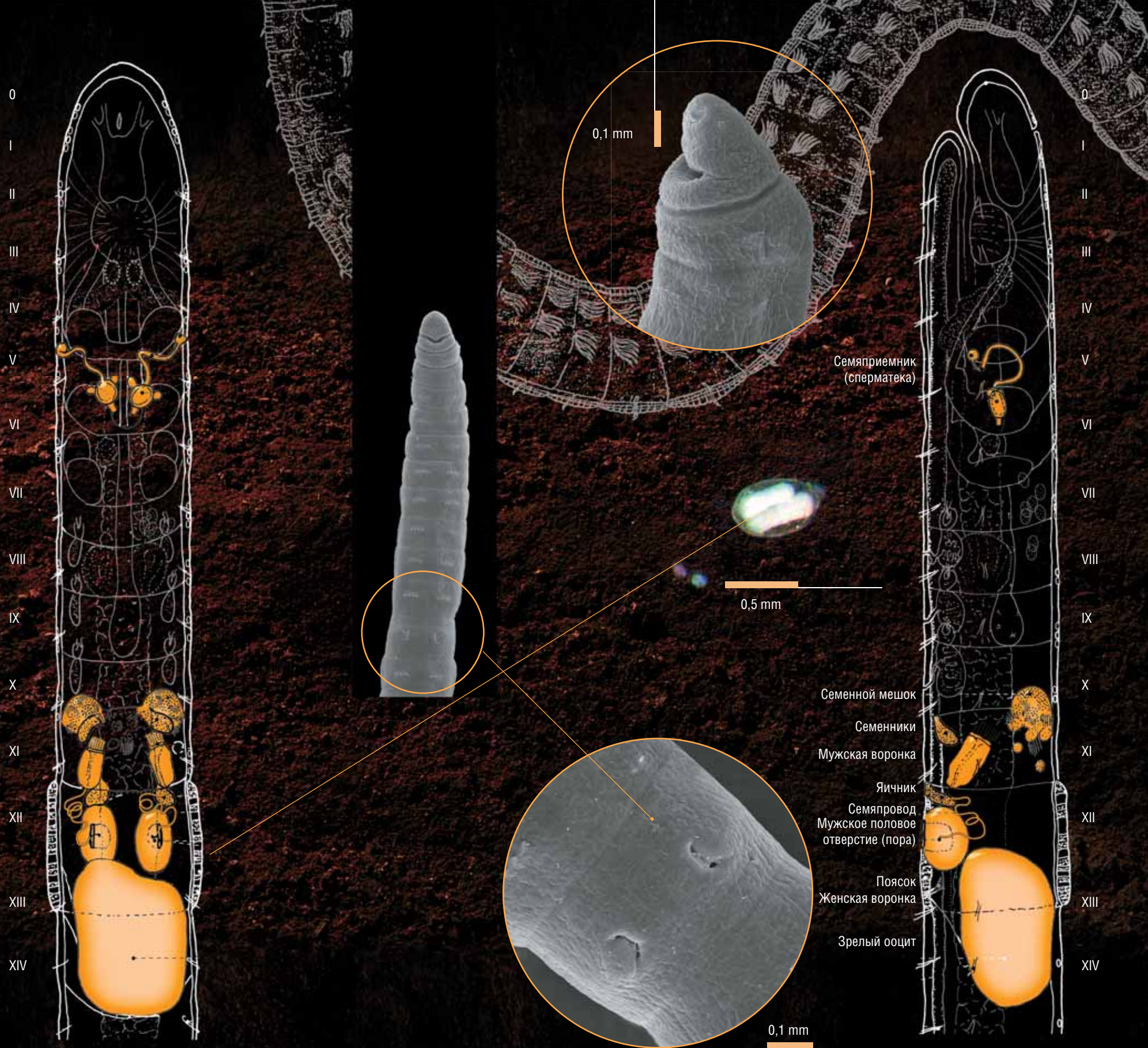
Внешне все олигохеты очень похожи друг на друга, поэтому одной из самых сложных задач для специалиста является определение их вида. Один из систематических признаков олигохет – количество щетинок, единственных твердых образований у этих мягкотелых животных. Но даже изучив разнообразные по форме и размерам щетинки под микроскопом, невозможно точно определить вид олигохеты. Для этого необходимо рассмотреть строение ее половой системы. Олигохеты – гермафродиты, т. е. имеют и женские, и мужские половые органы. Для того чтобы рассмотреть строение половой системы, необходимо сделать из червя препарат: разрезать его в продольной и поперечной плоскости и с помощью специальных веществ зафиксировать на стекле.

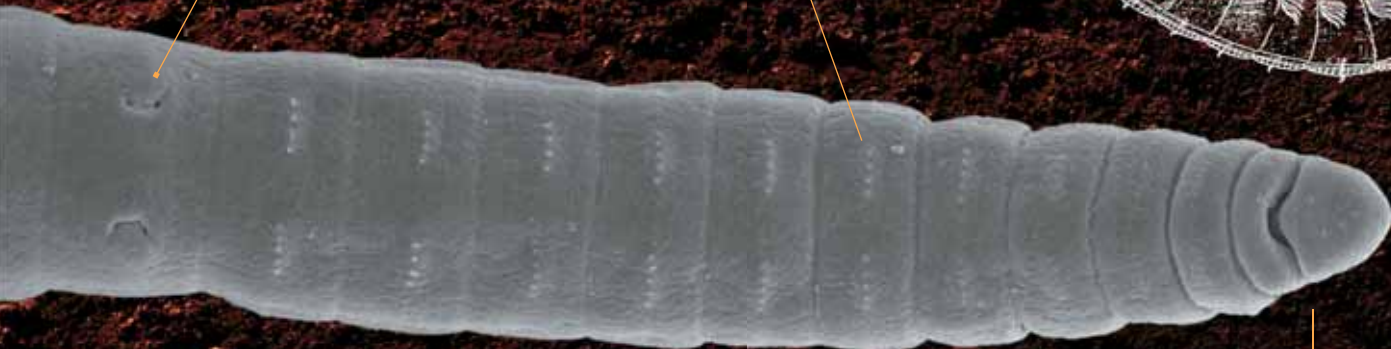
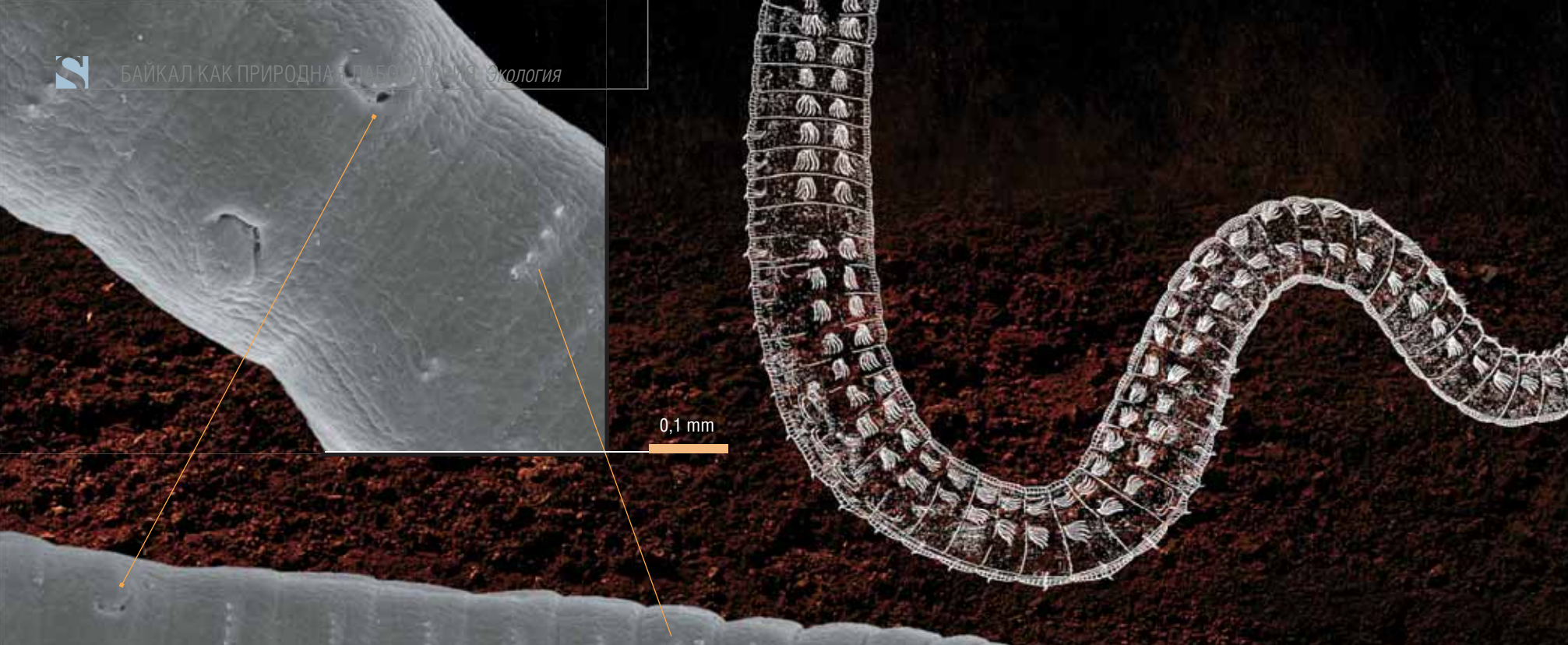


РАЗМНОЖЕНИЕ ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ

а – копуляция гермафродитных особей – взаимный обмен сперматозоидами;
б – откладка яиц в поясок;
в – оплодотворение яиц в пояске сперматозоидами из семяприемника. Кокон движется к голове червя;
г – откладка кокона

Схема строения половой системы энхитреид. По: Scmelz & Collado, 2010





Передний конец тела *M. bungei* до XII сегмента с брюшной стороны и его увеличенные фрагменты: мужские половые отверстия (поры) и несколько первых сегментов тела. Сканирующая электронная микроскопия



0,1 mm

Половая система олигохет чаще всего находится в нескольких сегментах тела. Снаружи эти сегменты образуют «объемный» поясok за счет активной работы желез эпителия. У половозрелых олигохет половой аппарат состоит из половых желез (семенники, яичники); половых протоков (мужских и женских с их железами и совокупительным аппаратом); семенных и яйцевых мешков и семяприемников (сперматек) (Чекановская, 1962).

На ранних стадиях развития половые клетки покидают половые железы и попадают в полость тела, а созревают они в специально предназначенных для этого семенных и яйцевых мешках. Зрелые половые клетки улавливаются мужскими и женскими воронками, которые снабжены «воротничком» из ресничек. «Пойманные» половые продукты по половым протокам выводятся наружу через мужские и женские половые отверстия или поры.

Когда олигохеты спариваются, они обмениваются спермой, которая хранится в семяприемниках до откладки кокона. Кокон образуется пояском и сдвигается



Большое скопление *M. bungei* можно увидеть на камнях возле уреза воды и на берегу озера

по телу червя, как муфта, по направлению к переднему концу. Когда он «проходит» сегмент с женскими половыми отверстиями, в него попадают женские половые клетки, а при прохождении через отверстия семяприемников – мужские половые клетки, которые достались этой олигохете от другой особи. Далее кокон с яйцами просто сбрасывается с головного конца червя.

Расположение разных частей половой системы, их наличие или отсутствие, размеры, форма и другие особенности являются основой родовых и видовых диагнозов (Семерной, 2004; Чекановская, 1962). Олигохета без половой системы (неполовозрелая или поврежденная) практически становится «безликой» для специалиста.

Экологический «индикатор» Байкала

Несмотря на уникальность, многочисленность и разнообразие байкальских олигохет, биология их практически не изучена.

Объектом моих исследований является эндемичная энхитреида *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen, 1901. На берегу Байкала можно встретить огромное количество этих червей, достаточно поднять камень на урезе воды, и под ним, скорее всего, окажется комок извивающихся бело-желтых «макаронов» – это и есть *M. bungei*. На вид эти энхитреиды ничем не примечательны и имеют, как и все водные олигохеты, небольшие размеры (5–40 мм).

M. bungei стал первым видом байкальских олигохет, особенности питания и дыхания которого были изучены. Как и у большинства олигохет, специальных органов дыхания у них нет – эти черви потребляют кислород всей поверхностью тела через внешние покровы. Эксперименты показали, что одна особь *M. bungei* потребляет $0,45 \cdot 10^{-2}$ мг кислорода в час (Зверева, 2015), и эти данные, возможно, помогут узнать больше о потоках энергии, проходящих через популяцию этих олигохет.



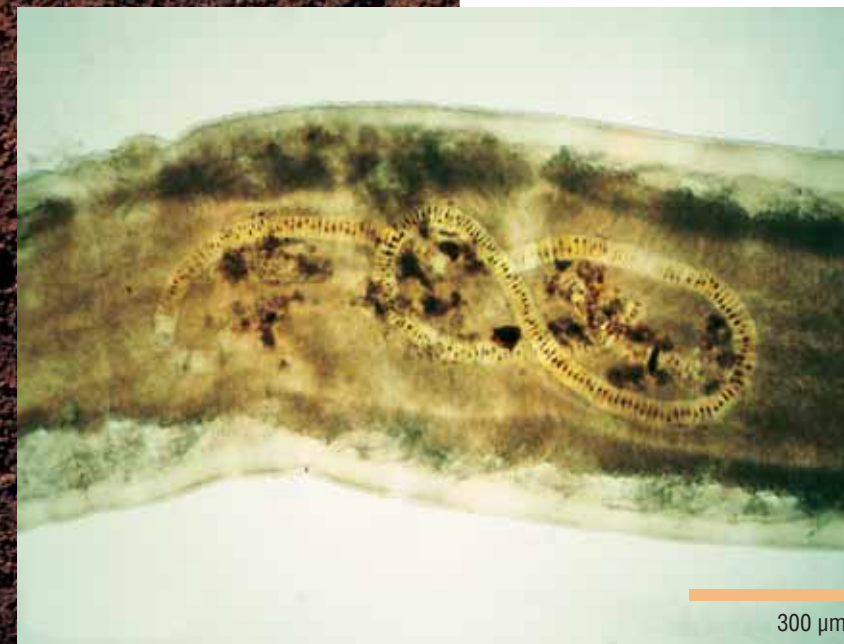
Питаются эти черви разнообразными остатками растений и животных, которые в большом количестве прибывают к берегу озера. Проанализировав pellets (фекалии) *M. bungei*, можно предположить, что, несмотря на огромное разнообразие пищи, которое озеро «предоставляет» этой энхитреиде, больше всего она любит зеленые нитчатые водоросли *Ulothrix zonata*, растущие недалеко от уреза воды на камнях (Зверева, 2012).

Изучение энхитрид может быть полезным и для экологического мониторинга озера. *M. bungei* очень широко распространен на Байкале, не только в прибрежной части, но и на глубине до 300 м (Снищицова, 1987). Благодаря своему широкому распространению по всему озеру, этот вид имеет большой потенциал как индикаторный объект, т.е. изучение которого могло бы помочь в слежении за состоянием экосистемы озера. В теплое время года сотрудники лаборатории биологии водных беспозвоночных ежемесячно отбирают пробы в заливе Большие Коты (Южный Байкал, 20 км от пос. Листвянка) и следят, как изменяется численность и биомасса энхитреид.

Следует отметить, что видовой список олигохет озера Байкал далек от завершения (Семерной, 2004), и несмотря на вековую историю их изучения, эти байкальские эндемики могут рассказать много интересного и полезного о себе и озере.

Внешний вид олигохеты на примере байкальской люмбрикулиды *Lamprodrilus cf. melanotus*

В публикации использованы фото автора



Зеленые нитчатые водоросли – любимое «лакомство» *M. bungei*. На фото – живая нить зеленой нитчатой водоросли *U. zonata* из береговых скоплений детрита; водоросли в кишечнике червя, просвечивающие через покровы тела и нить *U. zonata*, прошедшая через кишечник червя. Фото О.А. Тимошкина

Литература

Буруковский Р.Н. Зоология беспозвоночных: Учеб. пособие. СПб.: Проспект Науки. 2010. 959 с.

Зверева Ю.М. и др. Особенности экологии *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen (Annelida, Oligochaeta) – массового вида олигохет зоны заплеска озера Байкал // Изв. Ирк. гос. ун-та. Сер. Экология. 2012. Т. 5., № 3. С. 123–135.

Зверева Ю.М. и др. Дыхание водных олигохет (Annelida, Oligochaeta) и особенности потребления кислорода эндемичными *Enchytraeidae* озера Байкал // Гидробиологический журн. 2015. Т. 51, № 3. С. 17–29.

Семерной В.П. Олигохеты озера Байкал. Новосибирск: Наука, 2004. 528 с.

Чекановская О.В. Водные малощетинковые черви фауны СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 411 с.

Martin P. et al. Global diversity of oligochaetous clitellates (“Oligochaeta”; Clitellata) in freshwater // Hydrobiologia. 2008. V. 595, N 1. P. 117–127.

Shain D.H., Mason T.A., Farrell A.H., Michalewicz L.A. Distribution and behavior of ice worms (*Mesenchytraeus solifugus*) in south-central Alaska // Canadian Journ. of Zoology. 2001. V. 79, N 10. P. 1813–1821.

Выражаю искреннюю благодарность моему научному руководителю д.б.н., проф. Олегу Анатольевичу Тимошкину за помощь в подготовке публикации

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ «Мой первый грант» № 16-34-00074 «Массовые виды энхитреид (Annelida, Oligochaeta) зоны заплеска озера Байкал: внутривидовое генетическое разнообразие»

МЫ ЕСТЬ!



Ключевые слова: озеро Байкал, экологический кризис прибрежной зоны, Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук.

Key words: Lake Baikal, coast eutrophication, Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

«...Гуляют там животные невиданной красоты...»
БГ

В Байкале обитают различные организмы, а не только печально известная спиригира. Да она совсем и не ужасная, ее называют еще – «морской шелк», а в микроскопе спиригира – вообще красавица! Переливается своими спирально закрученными хлоропластами, как будто спрашивает: «Попробуй, определи меня до вида!» Другие байкальские обитатели тоже «задают» ученым много вопросов, а ученые – им. А как это происходит у олигохет? Как тихоходки умудряются выживать в открытом космосе? Есть ли польза от байкальских рыб, кроме гастрономической? «Хотим быть учеными!» – ответили девочки восьмиклассницы, на вопрос: «А зачем вы пришли к нам в институт?» “Keep their eyes shining!” – сказал как-то мой коллега Ричард Кроуфорд, известный классик-диатомист. По мнению Жореса Алферова, будущие крупные открытия будут совершены в биологии и медицине. Сможем ли мы принять в этом участие? Сможем ли мы сохранить горящими глаза молодых ребят?



ЛИХОШВАЙ Елена Валентиновна – доктор биологических наук, профессор (специальность «Гидробиология»), заведующая отделом ультраструктуры клетки Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Основные научные интересы – тонкое строение и систематика диатомовых водорослей, транспорт и отложение кремния живыми организмами, методы визуализации внутриклеточных процессов с помощью электронной микроскопии. Автор 170 научных работ, соавтор и редактор нескольких монографий

© Е. В. Лихошвай, 2016



Восьмиклассницы считают бляшки.
День российской науки
в Лимнологическом институте СО РАН.
Иркутск, февраль 2016 г.
Фото М. Башенхаевой

Реформа РАН была нужна, это теперь признают практически все. С тех пор много времени прошло, реформировалась и реформа. Будет ли достигнута ли ее цель?

Заключительный этап реформы совпал по времени с развитием экологического кризиса на Байкале. Хорошо ли – плохо, но эти события совпали.

Хронология кризиса

Напомню, что первым официальным изданием, осветившим проблему, стал журнал «НАУКА из первых рук», который опубликовал пронзительное и резонансное сообщение о гибели байкальских губок («Что случилось с байкальскими губками?», № 5 (41), 2011).

Подготовка и публикация первого научного сообщения (Кравцова и др., 2012) потребовали ответственности и смелости. Листвянка – центр притяжения, Байкал – источник питьевой воды, а тут такое творится! В этом комплексном исследовании биологов и химиков была названа возможная причина – эвтрофикация сточных вод. Спирогира стала основным действующим лицом. Не признать это было трудно.

Одновременно с реформой РАН и экологическим кризисом на Байкале случилась другая беда – падение уровня Байкала, и именно эту тему подхватили центральные СМИ.

Как-то ночью звонят корреспонденты из Москвы:

– Михаил Александрович *, правда, что Байкал высыхает?!

– К утру не высохнет, – последовал ответ, – у нас экологическая проблема – развитие спирогиры!

Информация об экологическом кризисе долгое время дальше локальных СМИ не проходила.

МА* делал доклады.

СТРАТЕГИЯ ОХРАНЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ И ЗАКОН «ОБ ОХРАНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ»

Доклад на круглом столе в Государственной думе РФ, Москва, 14 января 2013 г.

«...ФЦП по охране Байкала, к сожалению, практически не нацелена на решение экологических проблем в центральной экологической зоне. Одной из ключевых проблем является сброс неочищенных фекалий в Байкал с туристических судов. Другой – проблема засорения береговой линии бытовым мусором. Если на Байкале будет развиваться туризм, срочно требуется спроектировать и построить инфраструктуру для питьевого водоснабжения и канализования бытовых стоков».

* Академик РАН Михаил Александрович Грачев, директор ЛИИ СО РАН 1987–2015 г.

О ПРОБЛЕМАХ БАЙКАЛА

Заседание Президиума РАН, Москва, 18 ноября 2014 г.

«...Существует целевая Федеральная программа “Об охране озера Байкал и о социально-экономическом развитии байкальской природной территории”. 57 миллиардов рублей выделено на эту программу. Продолжительность четыре года.

Должен сказать, что из этой программы не нашлось ни одного рубля на то, чтобы сделать нормальные очистные сооружения в той зоне, которая прилегает непосредственно к Байкалу. На Байкале нужно построить порядка десяти очистных сооружений, причем не простых, а таких, которые удаляют азот и фосфор. А перед этим необходимо сделать проект и построить в выбранных точках водопроводные и канализационные трубопроводы.

Стоимость реализации проекта на Байкале может достигать одного миллиарда рублей. Это огромная сумма, но, может быть, какие-то мероприятия, упомянутые в ФЦП, можно отменить или отложить; требуется экспертиза, в которой могла бы принять участие Российская академия наук в соответствии с новым законом».

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИС НА БАЙКАЛЕ

Заседание Общественной палаты, Москва, 10 июня 2015 г.

«...В число ведомств, на которые возложен мониторинг экосистемы Байкала, не входит орган государственного управления наукой – ФАНО России. Чтобы решить неожиданно вставшую перед нами задачу и предложить наиболее эффективные меры для нормализации экологической обстановки на озере Байкал, необходимо изменить это положение.

ФАНО России нужно было бы получить заказ от государства на проведение комплексной экологической экспертизы современного состояния экологической системы озера Байкал, результатом которой должна стать выработка комплекса необходимых мероприятий и получение нужного результата в условиях жесткой экономии».

Первая публикация в центральной прессе, которую читает руководитель страны, появилась только 17 марта 2015 г. – в Федеральном выпуске № 6626 (55) «Российской газеты» – официальном печатном органе Правительства Российской Федерации. Статья называлась «Воду не пить», автор – Юрий Медведев:

«...Подобного экологического бедствия Байкал не знал 100 лет».

Нет, речь не идет об усыхании самого глубокого озера в мире, о чем последние недели постоянно сообщают в СМИ разные руководители. На самом деле у Байкала есть куда более серьезные проблемы. “Но на них никто не обращает внимания”, – сказал корреспонденту “РГ” директор расположенного на Байкале Лимнологического института СО РАН академик Михаил Грачев».

В редакции газеты сообщили, что этой темой может заинтересоваться обозреватель РГ Анатолий Петрович Юрков (главный редактор газеты в 1995–2001 гг.), МА дали его номер телефона. В результате 02.07.2015 в № 6715 (144) появилась статья «Великое озеро грозит уничтожить новый враг»:

«Без двух минут в полдень на моем мобильнике обозначился незнакомый номер.

– Академик Грачев. По чрезвычайному делу звоню. На Байкале зреет экологическая катастрофа... И, похоже, мы ее проморгали.

Михаил Александрович никогда не был похож на паникера. И если осторожно говорит, что, возможно, ее, беду, проморгали, то надо понимать так, что уже проморгали.

– А Академия наук, Михаил Александрович?

– Мы уже два раза официально докладывали, что происходит. Но это не то, что происходило с Байкальским бумкомбинатом. Там мы хоть знали, как процесс остановить. А тут она прет и прет. Надвигающаяся катастрофа очевидна только науке, администрация не хочет ее признавать, мол, наука опять шум поднимает».

Следом, 21 июля 2015 г. вышла статья Анатолия Петровича «Заступников много», РГ № 6730 (159).

Статьи в центральной прессе, тем более в печатном органе Правительства РФ, сделали возможным публикацию Б. Ващенко «Чужие на Байкале» в журнале *National Geographic* (13 ноября 2015 г.)

«...У этой тины, похоже, нет совести! – грустно шутит руководитель Лаборатории геносистематики Лимнологического института, профессор Иркутского университета Дмитрий Щербаков, работающий на Байкале с 1989 года, – Размножаясь в водах озера, эта чужеродная водоросль, судя по всему, угадала такую комбинацию генов, которая позволила ей победить всех местных, подобно хулигану на танцах». Именно в лаборатории профессора Щербакова из комка тины, взятого на анализ осенью 2013 года, извлекли несколько отдельных ниточек и расшифровали небольшой участок ДНК. Эта ДНК принадлежала спирогире. Правда, пока исследовано меньше одного процента всех водорослей в комке, и еще рано утверждать, что вся тина состоит из спирогиры».

Изложенные в перечисленных докладах и публикациях аргументы, видимо, оказались достаточно убедительными, чтобы руководство Сибирского отделения РАН обратило на них внимание. Не прошло и нескольких лет с начала кризиса, и 4 декабря 2015 г. на Общем собрании Сибирского отделения РАН, проходящем в новосибирском Академгородке, были представлены ключевые достижения сибирских учёных: «...Особое внимание академик А.Л. Асеев уделил результатам, нацеленным на экологическую и продовольственную безопасность. Он обозначил основной вывод из наблюдений за состоянием Байкала специалистами Лимнологического института СО РАН (г. Иркутск): «Предел устойчивости экосистемы озера превышен» («Наука в Сибири», 4 декабря 2015 г.).



Спустя еще три месяца, 18 марта 2016 г., на очередном Общем собрании СО РАН в числе шести аналитических записок и предложений, подготовленных Президиумом СО РАН за 2015 г., две – были посвящены экологической ситуации на Байкале: «Аналитическая записка Президиуму РФ об экологической катастрофе оз. Байкал», «Предложение СО РАН в Управление Президента РФ по научно-образовательной политике и о неотложных мерах по исследованию изменений экосистемы оз. Байкал».

Статьи А. П. Юркова в РГ продолжали выходить: 13 января 2016 г. «В ожидании «Черного лебедя»» (после выборов нового директора ЛИИ СО РАН), 17 мая 2016 г. «Омбудсмен для Байкала»:

«Фразу “история нас учит...” все считают аксиомой и лезут за мудростью в подвалы веков. Хотя вчерашний день – уже история. И он учит лучше, чем позавчерашний. Но никто не хочет умнеть на вчерашних ошибках. Может, они еще и не ошибки, а нечто гениальное, непонятое современниками – время покажет.»

Сейчас

Реформа продолжается. Десятипроцентное сокращение бюджета институтов по сравнению с прошлым годом привело к стагнации уже в середине мая. «Денег нет!». Нет денег на повышение в должности успешных ученых, нет денег, чтобы взять в институт успешных аспирантов. На реактивы – командировки – само собой. Сокращайтесь. А у нас

ИЗ УСТАВА ЛИМНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА СО РАН:

Институт является научным учреждением, выполняющим междисциплинарные комплексные исследования озера Байкал и других водоемов Сибири.

Основные научные направления деятельности Института:

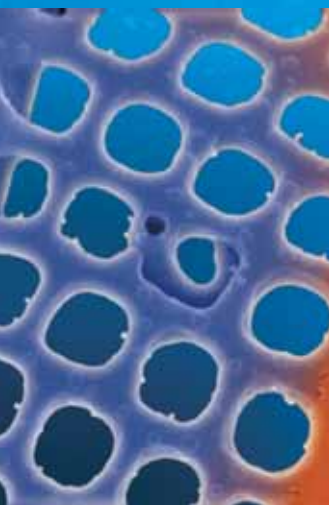
Лимнология: механизмы образования, биоразнообразие, эволюция озерных систем;

Современное состояние и прогноз развития водоемов и водотоков суши;

Живые системы: комплексное исследование гидробионтов методами классической и молекулярной биологии и смежных наук.

День российской науки
в Лимнологическом институте
СО РАН. Иркутск, февраль 2016 г.
Фото М. Башенхаевой





«каждой твари по паре» – химиков, физиков, генетиков, микробиологов, альгологов, зоологов – 11 разных специальностей аспирантуры! Какую сокращать?

Мы привыкли работать комплексно. И сейчас можем сделать новый шаг – от комплексных исследований к – системным. Кризис поразил экосистему озера, не только губок, болезнь которых – очевидна. В Байкале – несколько тысяч различных видов организмов. Они существуют вместе миллионы лет, между ними установились определенные связи, которые обеспечивают стабильность экосистемы. Изменилась экосистема прибрежной зоны – здесь «хозяйничает» спирогира. А как это повлияло на самочувствие других видов? Как изменение химического состава воды или прибрежных течений влияет на их размножение, рост, развитие? Как изменятся пищевые цепи-сети? Как вся экосистема функционирует и каков прогноз?

Кризис поставил эти вопросы. Поможет ли их решить реформа РАН? Без информационно-аналитических подходов здесь не обойтись. А с ними возможен прорыв к системной лимнологии. Об этом – в следующем номере журнала.

Мы есть! Не отводите глаз от наших проблем.

Литература

Академик Асеев назвал основные научные результаты 2015 года // Наука в Сибири, 4 декабря 2015 г. <http://www.sbras.info/news/akademik-aseev-nazval-osnovnye-nauchnye-rezultaty-2015-goda>.

Бормотов А.Е. Что случилось с байкальскими губками? // НАУКА из первых рук, 2011, №5 (41), С. 20–23.

Ващенко Б. Чужие на Байкале // National Geographic. 2015. № 146. С. 6. <http://www.nat-geo.ru/nature/827082-chuzhie-na-baykale/#full>

Грачев М.А. Смотрящие в огонь // НАУКА из первых рук, 2014, №2 (56), С. 26–43

Кравцова Л.С. и др. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в прибрежной части залива Лиственичного озера Байкал. // Докл. РАН. 2012. Т. 447 (2). С. 1–3.

Медведев Ю. Воду не пить // Российская газета. 2015 г. № 6626 (55).

Юрков А.П. Заступников много // Российская газета. 2015. № 6730 (159). <http://rg.ru/2015/07/21/ekologiya.html>.

Юрков А.П. Великое озеро грозит уничтожить новый враг // Российская газета, 02.07.2015, № 6715 (144)

Юрков А.П. В ожидании Черного лебедя // Российская газета. 2016. № 6871 (3). С. 18. <http://rg.ru/2016/01/13/baykal.html>.

Юрков А.П. Байкал вызывает... в суд // Российская газета. 2016. № 6907 (39). <http://rg.ru/2016/02/25/ozeru-bajkal-v-nedalekom-budushchem-grozit-ekologicheskaja-katastrofa.html>

Юрков А.П. Омбудсмен для Байкала // Российская газета. 2016. № 6973 (105). <http://rg.ru/2016/05/17/reg-sibfo/nuzhna-li-bajkalu-sistema-bezopasnosti.html>.

В публикации использованы фото В. Короткоручко

Автор выражает благодарность Г. И. Филипповой за работу по подбору публикаций по теме статьи

Некоторое время назад с главной страницы сайта Лимнологического института вдруг исчез фильм о Байкале; об организмах, его населяющих; и об ученых, их изучающих, созданный в 2006 г. В фильме звучит песня Бориса Гребенщикова «Под небом голубым есть город золотой ...»

Вместо фильма, статьи М. А. Грачева «Смотрящие в огонь» («НАУКА из первых рук», № 2(56), 2014), роликов и сообщений биологов об экологическом кризисе появился и висит одиноко *The Ecological Atlas of the Baykal Basin*, выпущенный на английском языке под редакцией сенатора А. К. Тулохонова. А там карты, карты

А в Байкале важна Жизнь. Каждый живой организм есть.

Куда бежит МАГНИТНЫЙ ПОЛЮС?

Куда указывает стрелка компаса? Ответ на этот вопрос даст любой: конечно, на Северный полюс! Более осведомленный уточнит: стрелка показывает направление не на географический полюс Земли, а на магнитный, и что в реальности они не совпадают. Самый знающий добавит, что магнитный полюс вообще не имеет постоянной «прописки» на географической карте. Судя же по результатам последних исследований, полюс не только имеет природную склонность к «бродяжничеству», но в своих блужданиях по поверхности планеты иногда способен перемещаться со сверхзвуковой скоростью!

Ключевые слова: магнитный полюс, скорость движения полюсов, геомагнитная вариация
Key words: magnetic pole, velocity of the pole displacement, geomagnetic variation



СЕМАКОВ Николай Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник магнитной обсерватории «Новосибирск» Алтае-Саянского филиала Геофизической службы РАН, доцент Новосибирского национального исследовательского государственного университета. Автор и соавтор 40 научных работ

КОВАЛЕВ Александр Анатольевич – инженер-исследователь магнитной обсерватории «Новосибирск» Алтае-Саянского филиала Геофизической службы РАН. Автор и соавтор 5 научных работ

ПАВЛОВ Анатолий Федорович – инженер-исследователь магнитной обсерватории «Новосибирск» Алтае-Саянского филиала Геофизической службы РАН. Автор и соавтор 47 научных работ

ФЕДОТОВА Ольга Ивановна – инженер-исследователь магнитной обсерватории «Новосибирск» Алтае-Саянского филиала Геофизической службы РАН. Автор и соавтор 15 научных работ

Земля окружена гигантским пузырем из магнитных полей, называемым магнитосферой. По мере ее продвижения в пространстве перед ней формируется сложная система заряженных частиц, источником которых является Солнце или магнитные структуры. Особый интерес представляет так называемая «область форшока», предшествующая головной ударной волне: ее изучение позволит понять, как энергия из окружающего пространства преодолевает этот барьер, проникая в магнитосферу. *Credit: NASA/GSFC*

© Н. Н. Семаков, А. А. Ковалев, А. Ф. Павлов, О. И. Федотова, 2016

Знакомство человечества с явлением земного магнетизма, судя по письменным китайским источникам, случилось не позднее 2–3 в. до н.э. Те же китайцы, несмотря на несовершенство первых компасов, заметили и отклонение магнитной стрелки от направления на Полярную звезду, т.е. на географический полюс. В Европе с этим феноменом познакомились в эпоху Великих географических открытий, не позднее середины XV в., о чем свидетельствуют навигационные инструменты и географические карты того времени (Дьяченко, 2003).

О смещении географического положения магнитных полюсов на поверхности планеты ученые заговорили с начала прошлого века после повторных, с интервалом в год, измерений координат истинного Северного магнитного полюса. С тех пор в научной печати достаточно регулярно появляется информация об этих «странствиях», особенно Северного магнитного полюса, который сейчас уверенно движется от островов Канадского арктического архипелага к Сибири. Раньше он перемещался со скоростью около 10 км в год, в последние же годы эта скорость возросла (Newitt *et al.*, 2009).

Но это касается изменения географического положения полюсов год от года, а насколько стабильно они ведут себя в масштабе реального времени – в течение секунд, минут, суток? Судя по наблюдениям путешественников, полярных мореплавателей и авиаторов, магнитная стрелка иногда вертится «как бешеная», поэтому устойчивость положения магнитных полюсов давно ставилась под сомнение. Однако до сих пор ученые не пытались оценить ее количественно.

В магнитных обсерваториях мира сегодня ведется непрерывная запись всех компонентов вектора магнитной индукции, которые применяют для расчета среднегодовых значений параметров магнитного поля и создания карт земного магнетизма, использующихся для выявления аномалий при проведении магниторазведочных работ. Эти же записи позволяют изучить и поведение магнитного полюса на временных интервалах меньше года.

Что же происходит с полюсом в спокойный период и во время магнитных бурь? Насколько сильно такая буря может «раскачать» магнитный диполь в центре Земли? И, наконец, насколько большую скорость способен в реальности развивать магнитный полюс?

Ответы на эти вопросы имеют не только научный, но и практический интерес. Ведь вместе со смещением магнитного полюса и расширением области его «блуждания» не только меняется область полярных сияний, но и возрастает риск возникновения аварийных ситуаций в протяженных линиях электропередач, помех в работе спутниковых навигационных систем и коротковолновой радиосвязи.

В СЕТИ ИНТЕРМАГНЕТА

Первые измерения магнитного склонения в России были проведены в 1556 г., во времена царствования Иоанна Грозного, в Архангельске, Холмогорах, в устье Печоры, на Кольском полуострове, о. Вайгач и Новой Земле. Измерение параметров магнитного поля и обновление карт магнитного склонения было настолько важным для мореплавания и других практических целей, что магнитной съемкой занимались участники многих экспедиций, мореплаватели и известные путешественники. Судя по «Каталогу магнитных измерений в СССР и сопредельных странах с 1556 по 1926 год» (1929), в их число входили такие мировые «звезды» как Амундсен, Баренц, Беринг, Борро, Врангель, Зеберг, Келль, Колчак, Кук, Крузенштерн, Седов и многие др.

Первые в мире обсерватории для исследования изменений параметров земного магнетизма были организованы в 1830-е гг., в том числе на Урале и в Сибири (в Нерчинске, Кольвани и Барнауле). К сожалению, после отмены крепостного права сибирская горнорудная промышленность, а с ней и сибирская магнитометрия, пришли в упадок. Мощными стимулами к организации новых обсерваторий, а также магнитных измерений на полярных станциях, так называемых пунктах векового хода, где производятся повторные определения элементов земного магнетизма через определенные промежутки времени, а также на дрейфующем льду, стали широкомасштабные комплексные исследования в рамках Второго международного полярного года (1932–1933) и Международного геофизического года (1957–1958). На сегодняшний день в нашей стране работает десять магнитных обсерваторий, входящих в мировую сеть магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ. Наиболее близко к магнитной обсерватории «Новосибирск» расположены обсерватории «Арти» (Свердловская обл.), «Диксон» (Красноярский край), «Алма-Ата» (Казахстан) и «Иркутск» (Иркутская обл.).



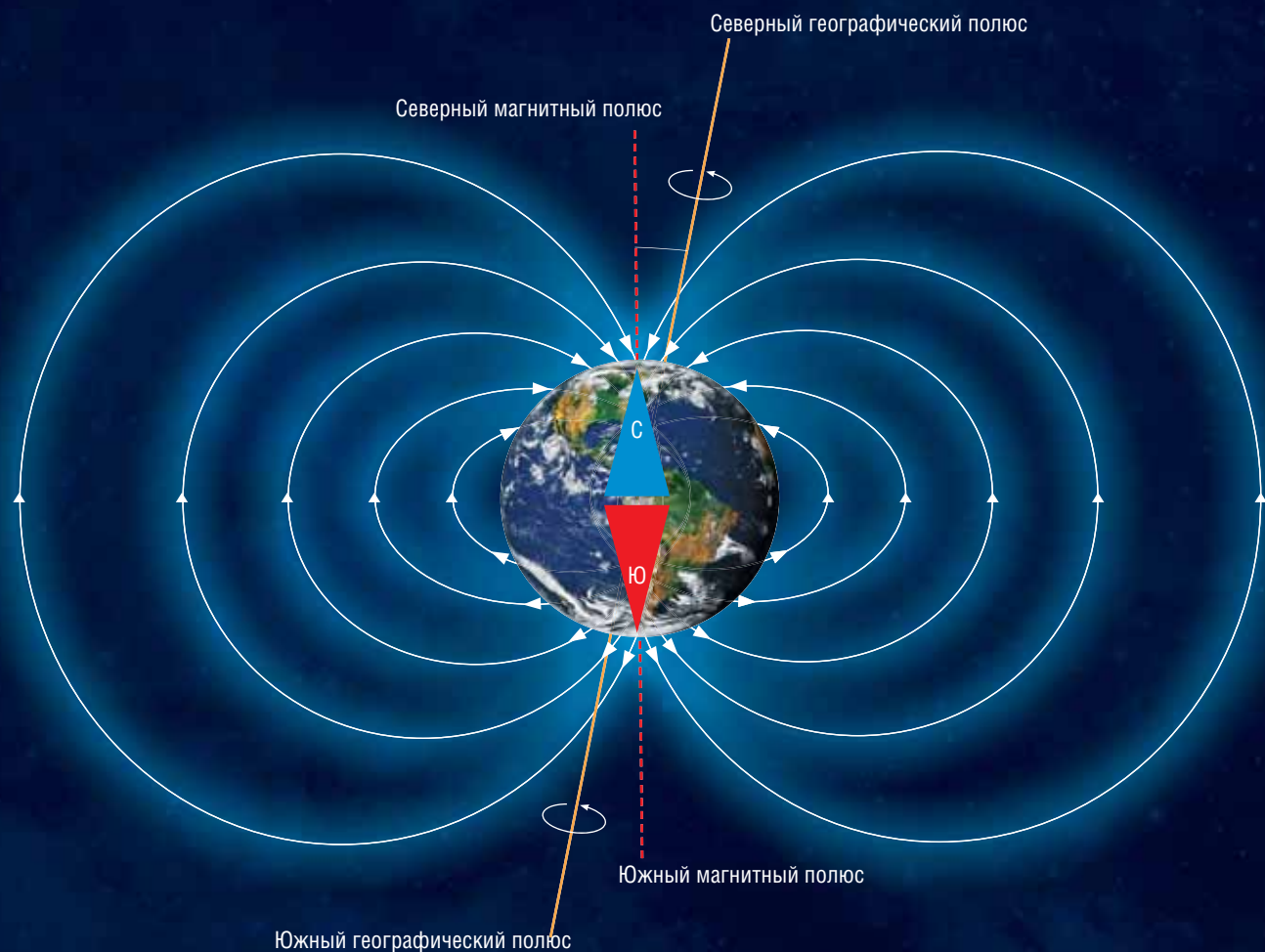
Художник Ф. Э. Чёрч, создавший в 1865 г. картину «Северное сияние», был свидетелем этого явления 23 декабря 1864 г. на о. Маунт-Дезерт (штат Мэн). В качестве «сцены» он использовал рисунок своего друга и полярного исследователя А. И. Хейса. Холст, масло. 142,3 x 212,2 см Смитсоновский музей американского искусства (Вашингтон)

За неземной, в прямом смысле этого слова, красотой полярного сияния стоит сильнейшее возмущение магнитного поля, сбивающее с толку компасы. «На пазорях матка дурит», – говорили в таких случаях русские поморы, связывая беспокойное поведение стрелки компаса («матки») с радужными небесными сполохами

Сквозь магнитные бури

К угловым элементам земного магнетизма относятся *магнитное склонение* (D), равное углу между северным направлением истинного (географического) и магнитного меридианов, и *магнитное наклонение* (I) – угол наклона магнитной стрелки по отношению к горизонту. Склонение характеризует величину «расхождения» между географическим и магнитным азимутами, наклонение – удаленность наблюдателя от магнитного полюса. При значении I = 90° (когда магнитная стрелка располагается вертикально) наблюдатель находится в точке истинного магнитного полюса. В остальных случаях по значениям D и I можно рассчитать координаты *виртуального магнитного полюса* (ВМП), который не обязательно совпадает с истинным из-за того, что представление глобального магнитного поля Земли в виде единого диполя все-таки является неоправданно упрощенным при его детальном исследовании.

Одним из самых, на наш взгляд, эффективных и наглядных способов исследования поведения полюсов является преобразование значений элементов земного магнетизма в более «интегральные» и удобные для сопоставления характеристики – мгновенные координаты магнитных полюсов и локальную магнитную постоянную (Bauer, 1914; Kuznetsov *et al.*, 1990; 1997). Преимущество этого преобразования в том, что оно не тре-



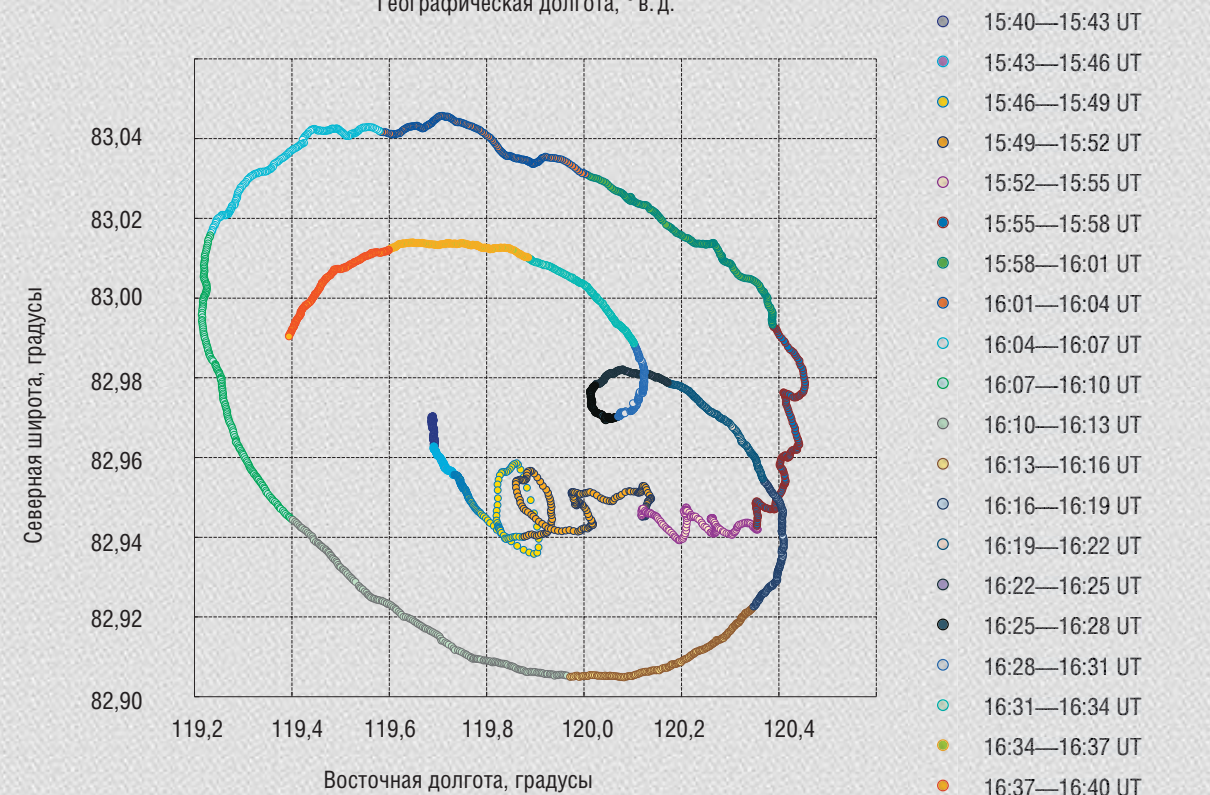
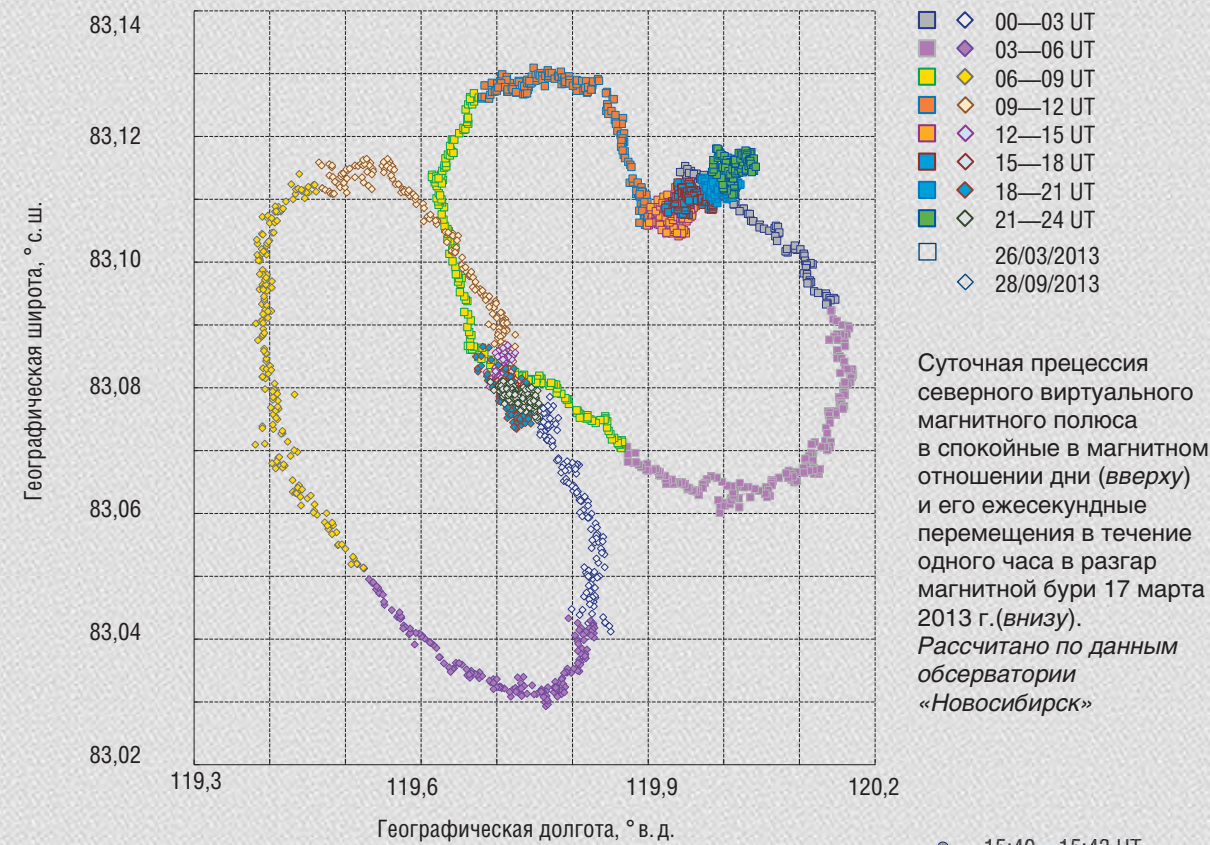
На схеме магнитного поля Земли отчетливо видно, что магнитные полюса не совпадают с географическими. По: (Peter Reid, The University of Edinburgh, 2011)

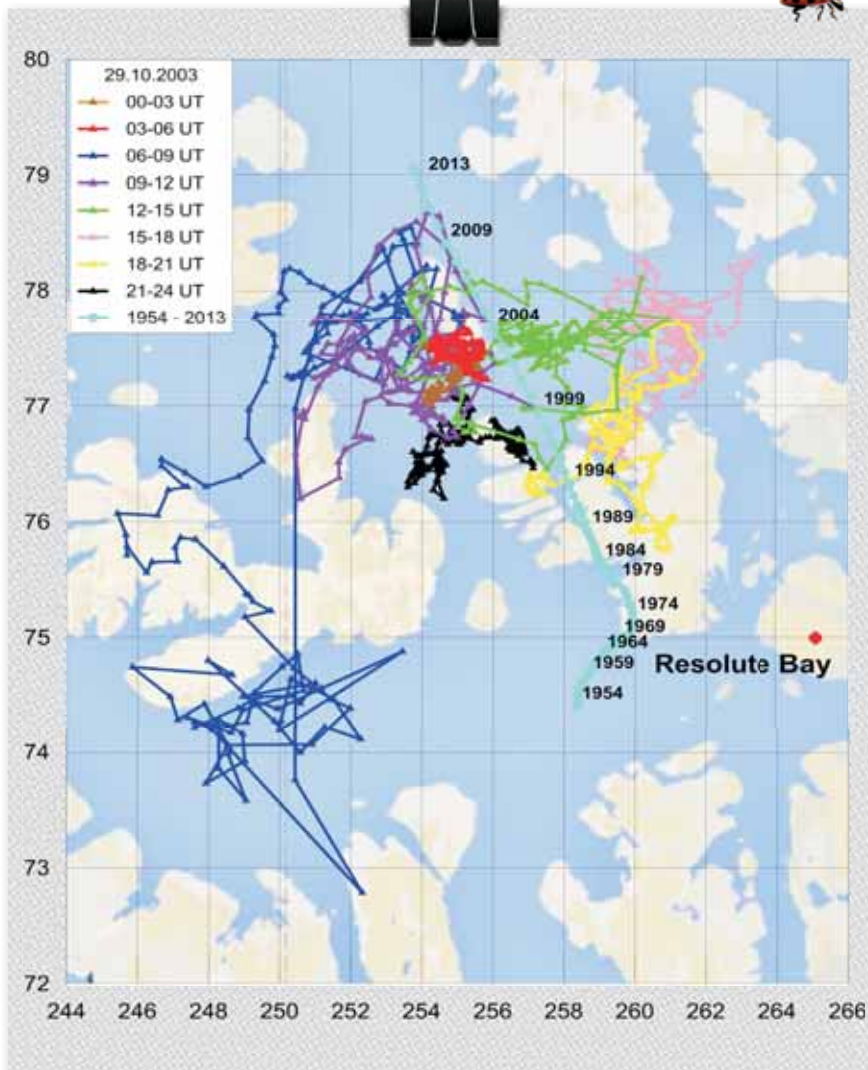
бует никаких предположений об истинных источниках наблюдаемого магнитного поля, но при этом позволяет увидеть, в частности, насколько магнитные полюса могут «разбегаться и разгоняться» на коротких (меньше года) временных интервалах.

Оказалось, что даже в дни спокойного состояния магнитного поля в периоды осеннего или весеннего равноденствия виртуальный северный магнитный полюс может вообще реально не побывать в точке своего рассчитанного «среднесуточного» положения! Дело в том, что в течение светового дня полюс не остается в неподвижности, а его «траектория» напоминает овал. Например, в спокойные дни по данным магнитной обсерватории «Ключи» (Новосибирск) северный магнитный полюс описывает по часовой стрелке петлю, вытянутую примерно на 10 км в направлении с юго-востока на северо-запад.

Во время магнитной бури колебания магнитной оси Земли происходят намного сильнее, но их также нельзя назвать хаотичными. Так, 17 марта 2013 г. всего за 20-минутный интервал магнитный полюс «пробежал» по эллипсу размером более 20 км, выписывая по пути мелкие вензеля с периодом в несколько секунд. Интересно, что в отдельные периоды возмущения магнитного поля полюс может менять направление своего движения, перемещаясь против часовой стрелки.

Одна из самых мощных магнитных бурь произошла 29–31 октября 2003 г. О степени «расшатывания» магнитного диполя ядра Земли во время этой бури можно судить по траектории движения северного магнитного полюса, который совершил настоящий «вояж» по окрестным островам, неоднократно отклоняясь в разные стороны на сотни километров от своей «нормальной», среднегодовой позиции. Для сравнения заметим,





Масштабы «блуждания» северного магнитного полюса во время мощнейшей магнитной бури 29 октября 2003 г. достигали семисот километров, что превышает среднюю длину пути, который полюс «прошел» за последние 60 лет. Рассчитано по данным магнитной обсерватории Резольют-Бей (Канада)

их дуги большого круга, которая и является минимальной оценкой пути, пройденного полюсом. Именно минимальной – потому что эта дуга представляет собой кратчайший путь по сфере от одной точки до другой. А общая траектория объекта нашего исследования на поверхности земного шара как во время магнитных бурь, так и в период «покоя» представляет собой не просто дугу, а набор «петель» различной формы и размеров.

Для вычисления скоростей виртуальных магнитных полюсов мы выбрали 17 марта 2013 г.: в течение этих суток наблюдалось как спокойное, так и возмущенное состояние магнитного поля. Для каждой из 1440 минут этих суток на основе минутных значений характеристик земного магнетизма был рассчитан путь, пройденный виртуальным магнитным полюсом, и определена скорость его движения.

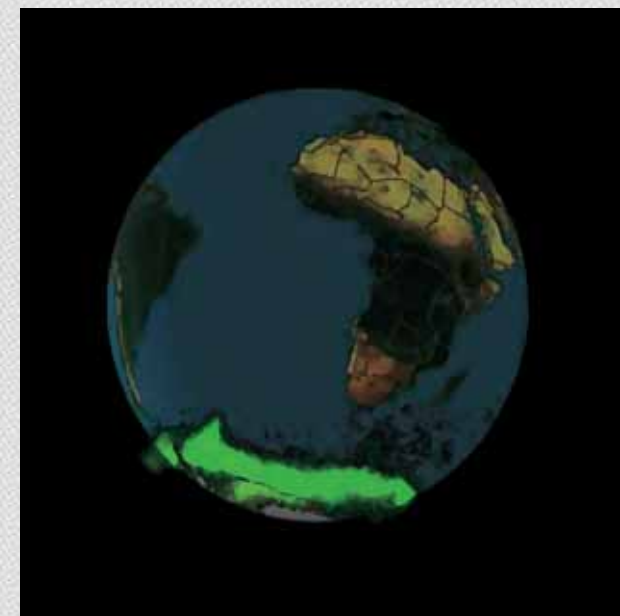
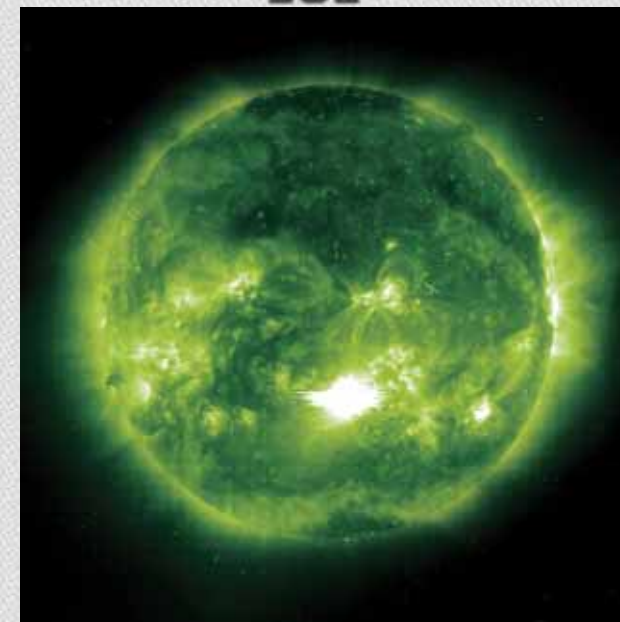
Результаты вычислений впечатлили даже опытных магнитологов: оказалось, что в отдельные моменты магнитные полюса могут перемещаться не только со скоростью автомобиля, но и реактивного самолета, превышающего скорость звука!

что путь, пройденный северным магнитным полюсом, рассчитанный по среднегодовым значениям склонения и наклонения на основе данных канадской обсерватории Резольют-Бей, за последние 40 лет представляет собой линию длиной не более 500 км.

Со скоростью звука

Сегодня в мире работает более ста магнитных обсерваторий, данные измерений которых сохраняются в единой базе ИНТЕРМАГНЕТ (InteRMagNet – International Real Magnetic Net). И хотя в ней обычно представлены данные с минутным интервалом, большинство магнитных обсерваторий измеряют значения элементов земного магнетизма ежесекундно. Но даже расчеты по средним минутным значениям на основе данных обсерваторий, расположенных на разных широтах земного шара, позволяют оценить закономерности и скорости движения магнитных полюсов.

Прежде чем рассчитать скорость движения полюса за определенный период времени, требуется преобразовать величины склонения и наклонения в координаты соседних географических точек, которые за это время посещал магнитный полюс, а затем оценить общую длину соединяющей



Третья по мощности из известных солнечных вспышек, когда-либо наблюдавшихся в рентгеновском диапазоне, была зафиксирована 28 октября 2003 г. (вверху). Корональному выбросу массы, направленному почти прямо на Землю, предшествовал выброс наэлектризованного газа. Рекордная вспышка стала причиной необычных полярных сияний в малонаселенных районах Антарктики (внизу), поэтому лишь немногим счастливицам удалось наблюдать это захватывающее зрелище. Credit: NASA/ESA

ЗДЕСЬ БЫЛ ПОЛЮС

Научное исследование земного магнетизма началось с работы английского врача и исследователя Вильяма Гильберта, который в 1600 г. издал труд «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле», где высказано предположение, что наша планета представляет собой большой дипольный магнит. Идея магнитного диполя, расположенного в центре земного шара, лежит в основе современной симметричной модели магнитного поля Земли. При этом два магнитных полюса, северный и южный, являются точками, в которых продолжение оси центрального диполя пересекает земную поверхность. Использование этой модели для расчета координат магнитных полюсов является обычным в палеомагнетизме (Merrill et al., 1998). Поэтому магнитологи издавна используют термин «виртуальный магнитный полюс» (ВМП) в значении «фактический» или «расчетный». Географические координаты этого полюса (широта Φ и долгота Δ) рассчитывают, исходя из фактических значений магнитного склонения (Δ) и магнитного наклонения (I), измеренных в определенный момент времени в точке с географической широтой φ и долготой λ :

$$\sin \Phi = \sin \varphi \times \cos \theta + \cos \varphi \times \sin \theta \times \cos \Delta,$$

$$\sin(\Delta - \lambda) = \sin \theta \times \sin \Delta / \cos \Phi, \text{ где } \text{ctg} \theta = \frac{1}{2} \text{tg} I.$$

Согласно этим формулам, два разноименных магнитных полюса находятся на расстоянии 180° дуги большого круга друг от друга. По мере приближения магнитного наклонения к 90° можно все более уверенно говорить о близости рассчитанной точки ВМП к истинному северному магнитному полюсу.

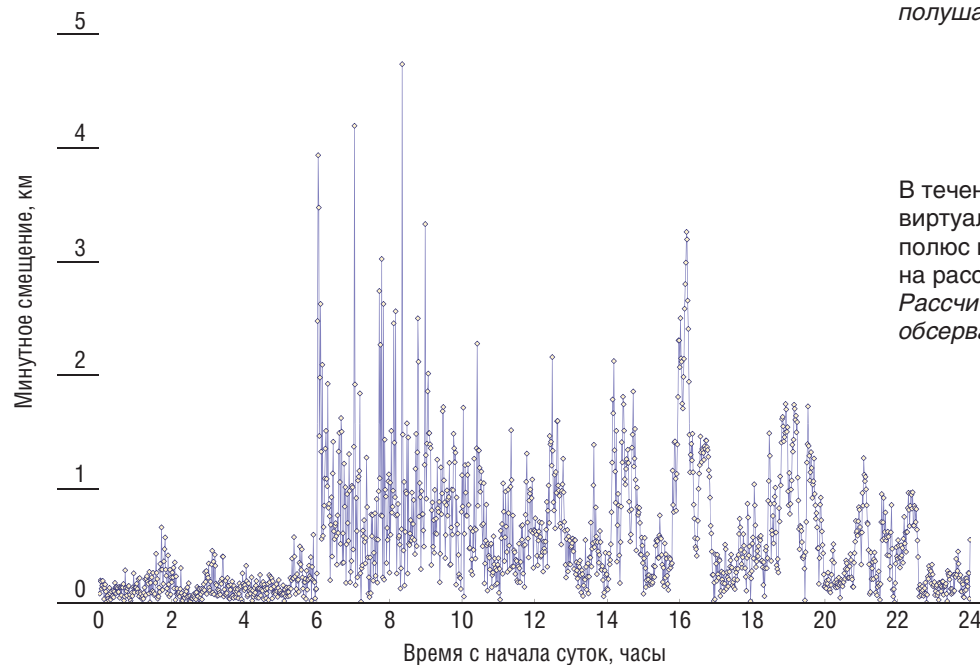
Как уже говорилось выше, по координатам Φ и Δ можно одновременно рассчитать положение и северного, и южного (противоположного) виртуальных магнитных полюсов. Однако в отношении истинного магнитного полюса точность такого определения координат вызывает сомнения в случае, если расчеты основываются на данных, полученных на очень большом удалении от самого этого полюса. В действительности из-за асимметрии магнитного поля Земли истинный северный и южный магнитные полюса вовсе не являются географически противоположными точками. Поэтому противоположные виртуальные магнитные полюсы, положение которых рассчитано по данным разных обсерваторий, часто являются на самом деле полюсами двух центральных магнитных диполей разной ориентации, а наиболее достоверную информацию о положении истинных магнитных полюсов в настоящее время можно получить только в Арктике и у берегов Антарктиды

Обсерватория	Код	Широта ϕ	Долгота λ	Δ , km	L , km	V_a , км/ч	V_x , км/ч
Резольют-Бей	RES	+74,7	265,1	275	3869	161,4	3922,8
Новосибирск	NVS	+55,0	82,9	41	804	33,5	284,3
Иркутск	IRT	+52,2	104,5	39	658	27,4	211,3
Алибаг	ABG	+18,6	72,9	15	132	5,5	77,4
Аддис-Абеба	AAE	+9,0	38,8	12	131	5,6	75,0
Вассорас	VSS	-22,4	316,4	43	400	16,7	279,2
Кейси	CSY	-66,3	110,5	184	3061	127,6	1796,6
Моусон	MAW	-67,6	62,9	264	6150	256,4	3702,4

L – пройденный путь, Δ – максимальный разброс положений вдоль дуги большого круга, V_a – средняя скорость перемещения, V_x – максимальная скорость перемещения. Положительное значение ϕ соответствует северной широте, отрицательное – южной

Интересно, что полученные оценки скоростей зависели от географического положения обсерваторий, данные которых были использованы для расчетов. Так, по данным среднеширотных и низкоширотных обсерваторий скорости движения виртуальных магнитных полюсов (как средние, так и максимальные) оказались значительно меньше, чем по данным обсерваторий, расположенных в Арктике и Антарктике. Кстати сказать, степень удаленности обсерватории от истинного магнитного полюса аналогично влияет и на суточный разброс положения виртуального магнитного полюса. Эти данные также свидетельствуют в пользу того, что наиболее точную информацию о параметрах движения истинных магнитных полюсов можно получить именно в тех районах, где эти полюсы реально «блуждают».

Параметры движения северного и южного виртуальных магнитных полюсов, так же как и разброс их пространственного положения за суточный период, рассчитанные по данным разных магнитных обсерваторий, существенно зависят от удаленности обсерватории от истинного магнитного полюса. Наиболее точную информацию о параметрах движения истинных магнитных полюсов можно получить в районах, наиболее приближенных к месту их реальной «дислокации». *Рассчитано по данным магнитных обсерваторий в соответствующем полушарии на 17 марта 2013 г.*



В течение суток 17 марта 2013 г. виртуальный северный магнитный полюс мог за минуту смещаться на расстояние свыше 4,5 км. *Рассчитано по данным обсерватории «Новосибирск»*



**КОММЕНТАРИЙ
ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА**

Авторы этой статьи – известные специалисты в области изучения магнитного поля Земли, много лет занимающиеся его мониторингом. Они предложили и реально осуществляют этот мониторинг путем отслеживания ежесекундного положения виртуального магнитного полюса (ВМП) наряду с измерением традиционных параметров – магнитного склонения, наклона и интенсивности в посто-

янной точке измерений в магнитной обсерватории «Новосибирск», которая входит в международную сеть данных «ИНТЕРМАГNET». Иллюстрации к статье наглядно показывают петлеобразные «блуждания» северного ВМП в различные временные интервалы: за сутки в спокойный период (за 25.03.2013 и 28.09.2013), за один час во время магнитной бури (17.03.2013), за сутки с трехчасовым интервалом во время сильнейшей магнитной бури (29.10.2003). А график смещения его положения за 17.03.2013 свидетельствует, что скорость движения полюса в минутном интервале может достигать 240 км/ч. Эти иллюстрации наглядно показывают очень большие вариации направления и скорости перемещения виртуального магнитного полюса, но, к сожалению, не дают им убедительного физического толкования, хотя, по моему мнению, они связаны с неустойчивостью и сильной изменчивостью ионосферы (внешней ионизированной и разряженной части земной атмосферы), особенно во время магнитных бурь.

Еще один важный вопрос, лишь затронутый в статье, – возможность мониторинга и предсказания момента приближения инверсии магнитного поля. Во время инверсии (длительностью до несколько тысяч лет), как это наблюдалось сотни раз за последние 500 млн лет, интенсивность магнитного поля ослабевает в десятки раз. Это может привести к очень серьезным техническим проблемам и даже кризису техногенной цивилизации (нарушению или исчезновению космической и коротковолновой радиосвязи, ослабеванию или нарушению работы трансформаторов, некоторых электрогенераторов и многим другим эффектам, еще не описанным и не предсказанным). Для пояснения этой проблемы важно показать вариации интенсивности магнитного поля во время магнитных бурь, а также возможные пути колебаний ВМП при приближении к точке инверсии (ускорение раскачиваний ВМП и увеличение их амплитуды, переход через 60 параллель и другие индикаторы)

Академик РАН Н.Л. Добрецов

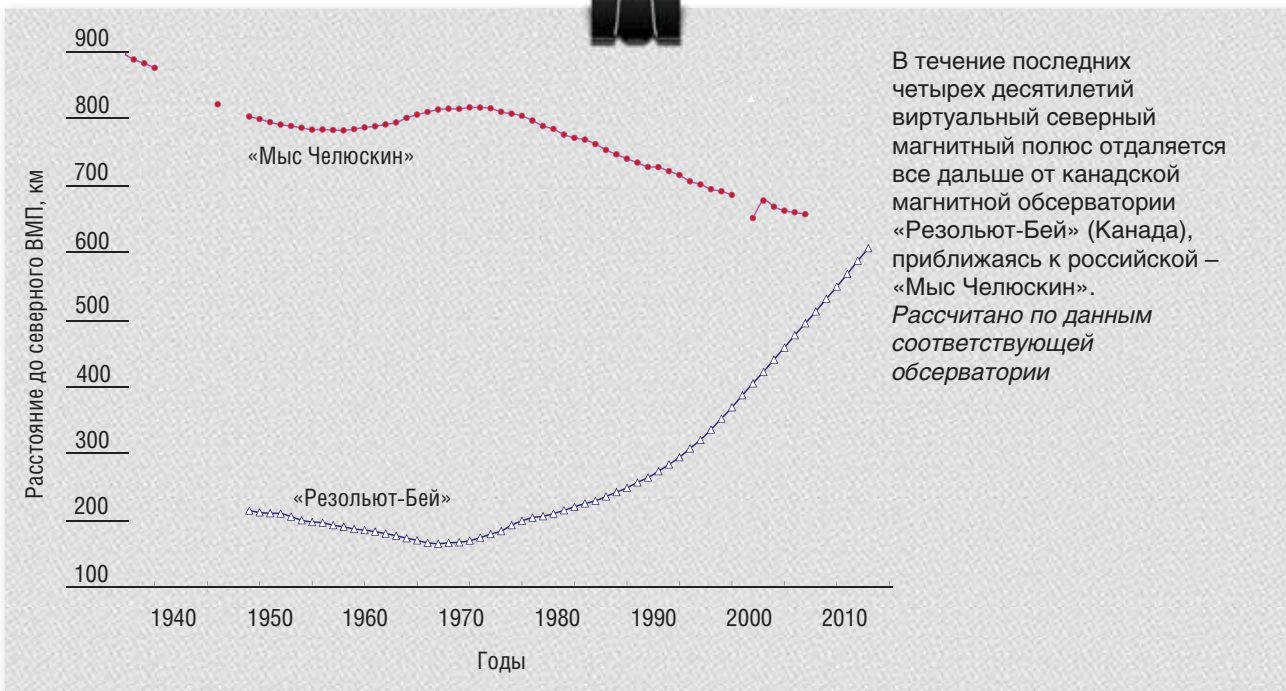
Магнитные обсерватории дают сегодня много информации об изменении географического положения магнитных полюсов Земли год от года. При этом скорости движения виртуальных магнитных полюсов, рассчитанные на основе данных обсерваторий из различных регионов, значительно варьируют (от 2-х до 65-ти км в год) и могут существенно меняться со временем. Арктические же исследования по установлению положения истинного северного магнитного полюса, которые в течение нескольких последних десятилетий ведут канадские магнитологи, очень сложны (Newitt, Niblett, 1986; Newitt, Barton, 1996, Newitt *et al.*, 2009).

На практике магнитологи во время наблюдений в обсерваториях и «в поле», как правило, имеют дело с фактическими («мгновенными») значениями элементов земного магнетизма, привязанными к конкретной секунде и конкретному месту. И скорости движения магнитных полюсов, определенные на основе таких экс-

периментальных данных, оказываются намного больше скоростей, полученных при последующих усреднениях (минутных, часовых, суточных, годовых). При каждой такой процедуре траектории движения полюса становятся все более «выпрямленными», а скорости его движения, соответственно, уменьшаются.

Однако минутные и секундные данные магнитных обсерваторий, пересчитанные в соответствующие географические координаты магнитных полюсов, показывают удивительную подвижность последних. Представим себе сложность ситуации, в которую могут попасть наши канадские коллеги, занимающиеся установлением положения истинного северного магнитного полюса в то время, когда он «летает» мимо них со скоростью самолета ледовой разведки!

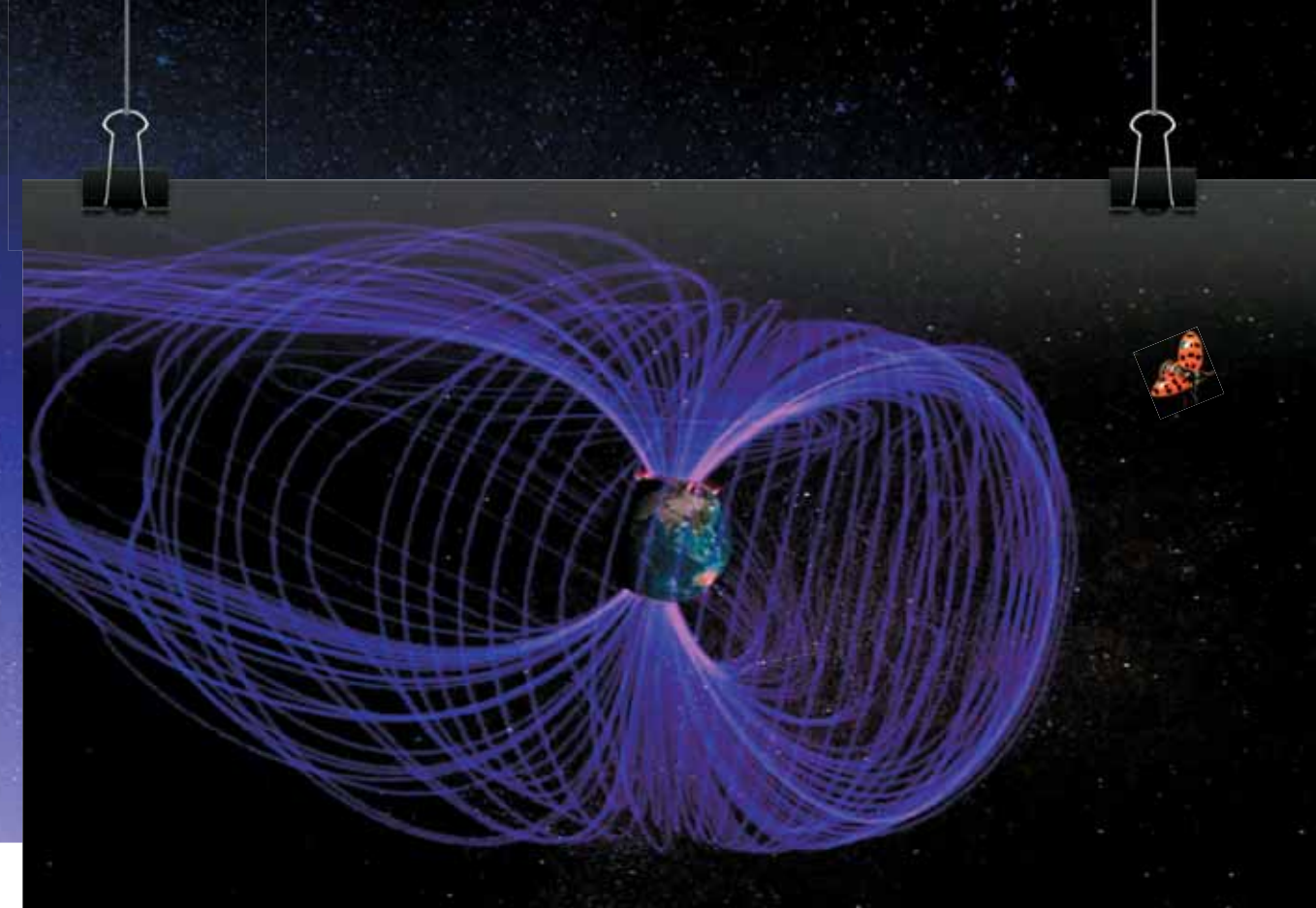
Любопытный вывод можно сделать и относительно инверсии магнитного поля Земли, то есть перехода северного магнитного полюса в южное полушарие (или южного – в северное). Если допустить, что истинные



магнитные полюса могут приближаться к географическому экватору со среднегодовой скоростью порядка 10 км/год, то процесс инверсии может уложиться в 1–2 тыс. лет. Но если бы они могли достаточно долгое время сохранять такое целенаправленное движение со скоростью самолета, автомобиля или даже пешехода, то инверсия произошла бы за считанные годы, дни и даже часы!

Чем ближе к полюсу находится магнитная обсерватория, тем ближе будут располагаться координаты истинного магнитного полюса и виртуального,

Эта впечатляющая фотография полярного сияния над северо-западной частью Тихого океана была сделана с Международной космической станции 20 января 2016 г. Image Credit: ESA/NASA



Космические исследования магнитосферы Земли кластером из пяти микроспутников в рамках проекта THEMIS дали ответы на многие вопросы относительно «космической погоды», в том числе появления бурь над магнитными полюсами Земли, вызывающих полярные сияния. Credit: NASA

рассчитанного на основе параметров магнетизма, измеренного этой обсерваторией. Ближайшими к северному магнитному полюсу обсерваториями в последние годы были канадская магнитная обсерватория «Резольют-Бей» и российская – «Мыс Челюскин». При этом, как свидетельствует многолетние данные, от первой обсерватории полюс удалялся, а ко второй приближался. В ближайшие десятилетия область «блуждания» северного магнитного полюса может переместиться в российский сектор Арктики, поэтому уже сейчас, на наш взгляд, уместно ставить вопрос об организации российской службы истинного магнитного полюса. Остро встает вопрос и об организации современной арктической геомагнитной обсерватории на побережье моря Лаптевых или архипелаге Северная Земля вместо обсерватории «Мыс Челюскин», закрытой в 2011 г.

Авторы благодарят всех сотрудников магнитных обсерваторий сети «ИНТЕРМАГНЕТ», данные которых были использованы в работе

Лумература
 Bauer L.A. The local magnetic constant and its variations // *Terr. Mag. (Washington)*, 1914. V. 19. P. 113–125.
 InterMagNet (International Real Magnetic Network, 2013) register. URL: <http://www.intermagnet.org/data-donnee/>
 Kuznetsov V. V., Pavlova I. V., and Semakov N. N. Estimation of the Position of Virtual Magnetic Poles // *Geol. Geofiz.* 1990. V. 31. N. 2. P. 115–116.
 Kuznetsov V. V., Pavlova I. V., Semakov N. N., Newitt L. R. Virtual magnetic poles, magnetic anomalies, and the location of the north magnetic pole // *Russian Geology and Geophysics*, 1997. V. 38. N. 7. P. 1312–1320.
 Merrill R. T., McElhinny M. W., and McFadden P. L. The magnetic field of the Earth, paleomagnetism, the core and the deep mantle // *Academic Press*, 1998. 531 pp.
 Newitt L. R. and Barton C. E. The position of the North Magnetic Pole in 1994 // *J. Geomag. Geoelectr.*, 1996. V. 48. P. 221–232.
 Newitt L. R., Chulliat A., and Orgeval J.-J. Location of the North Magnetic Pole in April 2007 // *Earth Planets Space*, 2009. V. 61. P. 703–710.
 Newitt L. R. and Niblett E. R. Relocation of the north magnetic dip pole // *Can. J. Earth Sci.* 1986. V. 23. P. 1062–1067.
 Weinberg B. P. Catalogue of magnetic determinations in U.S.S.R. and in adjacent countries from 1556 to 1926 // *Central Geophysical Observatory, Leningrad*, 1929.

В мире науки

SCIENTIFIC AMERICAN

Ежемесячный научно-информационный журнал

www.sci-ru.org

№3, 4, 5-6 2016



Главные темы номеров

Где я? Куда я иду?

Наша способность управлять самолетом, автомобилем или же просто гулять по городским улицам претерпела кардинальную трансформацию в связи с изобретением GPS. Как же, однако, мы ориентировались на местности до этого открытия? Недавние исследования показали, что мозг млекопитающего содержит собственную подобную GPS-навигатору и невероятно изощренную систему, которая помогает проложить маршрут от одного места к другому.

В поисках планеты X

Некоторые странные объекты в поясе Койпера заставляют предположить, что где-то на окраинах Солнечной системы, вероятно, скрывается крупная планета (размерами больше Земли), у которой даже может быть свой спутник. Эти объекты слишком далеки, чтобы их были способны обнаружить существующие телескопы, но обсерватории будущего имеют шансы «засечь» их.

Человек-загадка

Обнаружение костей, которые предположительно принадлежат неизвестному ранее виду древнего человека, привело в смятение и ученых, и средства массовой информации.

Мозг в каменном веке

Исследователи придумали оригинальный способ изучения развития сознания: они изготавливают примитивные орудия и сканируют при этом собственный мозг.





Панорама средней котловины оз. Байкал с высоты берегового утеса. Фото В. Короткоручко

