



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Great Lakes Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jglr

Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia)



O.A. Timoshkin ^{a,*}, M.V. Moore ^b, N.N. Kulikova ^a, I.V. Tomberg ^a, V.V. Malnik ^a, M.N. Shimaraev ^a, E.S. Troitskaya ^a, A.A. Shirokaya ^a, V.N. Sinyukovich ^a, E.P. Zaitseva ^a, V.M. Domysheva ^a, M. Yamamuro ^c, A.E. Poberezhnaya ^a, E.M. Timoshkina ^a

^a Limnological Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya str., 3, Irkutsk 664033, Russia

^b Department of Biological Sciences, Wellesley College, Wellesley, MA 02481, USA

^c Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo Environment Bldg 562, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa 277-8563, Japan

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 June 2017

Accepted 25 January 2018

Available online: 15 February 2018

Communicated by Joseph Makarewicz

Keywords:

Spirogyra bloom

Baikal

Drivers

Eutrophication

Remediation

ABSTRACT

Lake Baikal, an ancient lake in Siberia, contains more endemic species than any other lake in the world with most of them residing in the benthic littoral zone. Explosive growth of benthic *Spirogyra*, a filamentous green alga, began approximately in 2011 in localized coastal areas, with the most severe examples occurring near coastal towns that lack a wastewater treatment facility or have a malfunctioning system. At other sites (small settlements, harbors), however, the cause of its excess growth is less obvious. Multiple hypotheses have been offered including lake level fluctuations, climate warming, a relaxation of grazing pressure, and coastal eutrophication. We assessed these hypotheses using data on historical lake levels, water temperature, the spatial-temporal distribution of *Spirogyra* along inhabited and non-inhabited shorelines, and measurements of fecal coliform bacteria and nutrients in ground water, interstitial water, and lake water. These data suggest that groundwater contamination is the primary cause of coastal eutrophication. Most houses and buildings in small settlements around Lake Baikal lack septic tanks but use unlined cesspools to collect human waste. This untreated human waste enters groundwater via passive filtration through permeable soils and flows to the coastal zone where it drives excess growth of *Spirogyra*. Remediation – including installation of septic systems, modernization of existing sewage treatment plants in coastal towns, and the adoption of non-phosphate containing detergents – as well as a reconsideration of the federal monitoring system regarding the coastal zone is urgently needed to protect this extraordinary lake.

© 2018 International Association for Great Lakes Research. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

Journal of Great Lakes Research 44 (2018) 230–244

(перевод на русский язык)

Загрязнение грунтовых вод стоками вызывает всплеск роста бентосных водорослей в литоральной зоне озера Байкал (Восточная Сибирь)¹

О.А. Тимошкин ^a, М.В. Мур ^b, Н.Н. Куликова ^a, И.В. Томберг ^a, В.В. Мальник ^a, М.Н. Шимараев ^a, Е.С. Троицкая ^a, А.А. Широкая ^a, В.Н. Синюкович ^a, Е.П. Зайцева ^a, В.М. Домышева ^a, М. Ямамура ^c, А.Е. Побережная ^a, Е.М. Тимошкина ^a

¹ © ПЕРЕВОД СТАТЬИ НА РУССКИЙ ЯЗЫК ВЫПОЛНЕН ТИМОШКИНОЙ Е.М.

ВСТАВКИ ТЕКСТА, ВЫДЕЛЕННОГО СИНИМ ЦВЕТОМ В КВАДРАТНЫХ СКОБКАХ, СОСТАВЛЕНЫ ТИМОШКИНЫМ О.А. В КАЧЕСТВЕ ПОЯСНЕНИЙ, ДЛЯ ЛУЧШЕГО ПОНИМАНИЯ РУССКОГО ВАРИАНТА СТАТЬИ.

^a Лимнологический Институт Сибирское отделение
Российской Академии наук, ул. Улан-Баторская, 3, 664033
Иркутск, Россия

^b Факультет биологических наук, Колледж Уэсли, Уэсли,
МА 02481 США

^c Школа Пограничных наук, Отделение окружающей среды,
Университет Токио, строение 562, 5-1-5 Кашиванога,
Кашива 277-8563, Япония

Резюме. Озеро Байкал, древнее озеро Сибири, содержит больше эндемичных видов, чем любое другое озеро в мире, большинство из которых населяют дно литоральной зоны. Всплеск роста бентосной *Spirogyra*, нитчатой зеленой водоросли, началось примерно в 2011 г. в отдельных районах прибрежной зоны, наиболее серьезные проявления которого наблюдались вблизи прибрежных городов, где отсутствовала система очистки сточных вод, либо она была нарушена. В других местах (мелкие поселения, бухты), однако, причина этого избыточного развития была не столь очевидной. [Для объяснения этого явления были] предложены многочисленные гипотезы, включая колебания уровня озера, потепление климата, снижение влияния выедания [со стороны беспозвоночных, питающихся водорослями] и эвтрофикация побережья. Нами проанализированы все эти гипотезы, с использованием многолетних данных по колебанию уровня озера и температуры воды, а также – пространственно-временному распределению *Spirogyra* вдоль населенных и ненаселенных участков побережья, по измерению концентраций фекальных бактерий и биогенных элементов в грунтовых водах, интерстициальных и озерных водах. Согласно этих данных загрязнение грунтовых вод является главной причиной эвтрофикации побережья. Большинство строений и домов в маленьких поселениях вокруг озера Байкал не имеют [изолированных] септиков, а снабжены необлицованными выгребными ямами для сбора жидких отходов человеческой деятельности. Эти необработанные отходы поступают в грунтовые воды путем пассивной фильтрации сквозь проницаемые почвы и стекают в прибрежную зону, где вызывают массовое развитие *Spirogyra*. Срочно необходимо восстановление [естественного состояния экосистемы прибрежной зоны озера]. Для этого требуется установить изолированные септики [в частных домах и гостиницах], модернизировать существующие станции очистных сооружений в прибрежных городах и применять моющие средства, не содержащие фосфаты. Кроме того, для защиты этого необыкновенного озера необходим срочный пересмотр федеральной системы мониторинга касательно прибрежной зоны.

Ключевые слова: массовое развитие *Spirogyra*, Байкал, движущие силы, эвтрофикация, оздоровление.

Введение

Антропогенная эвтрофикация (избыточное поступление биогенных элементов в результате деятельности человека) является одной из главных проблем, затрагивающих озера, реки и океаны по всему миру (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Уязвимость пресноводных экосистем к антропогенной эвтрофикации и восстановление многих из них вслед за снижением [поступления] биогенных элементов путем отвода сточных вод [за пределы водоема], либо применения продвинутых систем очистки стоков исследовалась

на протяжении почти 6 десятилетий (обзор [Smith and Schindler, 2009](#)). Стоит отметить, тем не менее, что большая часть этих работ была нацелена на изучение эвтрофикации водной толщи. Однако, бентосная зона прибрежных районов, особенно крупных олиготрофных озер, возможно, первой «откликается» на поступление биогенных элементов в результате [человеческой] деятельности на суше ([Rosenberger et al., 2008](#); [Schneider et al., 2014](#)). В подобных [крупных] озерах понадобится поступление экстраординарного количества биогенных элементов для эвтрофикации всего большого объема водной толщи, но относительно небольшие стоки биогенных элементов в субстрат литоральной зоны могут вызвать избыточный рост бентосных растений ([Barton et al., 2013](#); [Lambert et al., 2008](#)).

Озеро Байкал, крупнейшее по объему озеро в мире, содержит больше эндемичных видов, чем любое другое озеро, причем, большинство его уникальных видов населяет бентосную часть литоральной зоны ([Timoshkin, 2011](#)). Всплеск роста бентосной *Spirogyra*, нитчатой зеленой водоросли, начался примерно в 2011 г. в ограниченных прибрежных районах озера ([Timoshkin et al., 2016](#)), и наиболее яркие проявления этого наблюдались вблизи прибрежных городов, где либо отсутствовала станция по очистке сточных вод, либо очистные сооружения работали с нарушениями, позволяя излишним биогенным элементам поступать в прибрежную зону ([Khodzher et al., 2017](#); [Kravtsova et al., 2012, 2014](#); [Timoshkin et al., 2016](#); [Tomberg et al., 2017](#)). Во всех этих районах биогенные элементы, поступающие из рек в прибрежную зону, вызывали рост их концентраций по сравнению с базовыми значениями в 20–60 раз ([Khodzher et al., 2017](#); [Tomberg et al., 2017](#)).

На других участках побережья (небольших поселениях, гаванях) причина чрезмерного развития *Spirogyra* менее очевидна. На таких участках грунтовые воды, загрязненные биогенными элементами, могут поступать в субстрат береговой зоны и способствовать росту *Spirogyra*. Действительно, результаты гидрологических исследований, проводимых в озерах умеренной зоны, показывают, что поступление [«разгрузка»] грунтовых вод часто бывает вблизи озерной береговой линии и уменьшается по мере удаления от берега, но есть и исключения ([Rosenberry et al., 2015](#)). грунтовые воды могут поставлять значительное количество биогенных элементов в олиготрофные озера ([Lewandowski et al., 2015](#)), способствуя эвтрофикации ([Meinikmann et al., 2015](#)). Большинство исследований биологического отклика на просачивающиеся и поступающие с подземным стоком в озера биогенные элементы (в частности, фосфор и азот) сконцентрированы на макрофитах, и эти работы показывают увеличенную биомассу ([Frandsen et al., 2012](#); [Lodge et al., 1989](#)), усиленный рост ([Frandsen et al., 2012](#)), и изменение химического состава тканей листьев ([Sebestyen and Schneider, 2004](#)). И наоборот, реакция прибрежных бентосных водорослей и эпифитов на поступление с грунтовыми водами биогенных элементов мало изучена, но существующие работы также показывают на увеличение биомассы водорослей ([Hagerthey and Kerfoot, 1998](#); [Périllon et al., в печати](#)) и измененный видовой состав ([Hagerthey and Kerfoot, 2005](#)).

В данной статье мы используем данные пространственно-временного распределения *Spirogyra* вдоль населенных и ненаселенных побережий озера Байкал и измерения концентраций бактерий фекального загрязнения, и биогенных элементов в грунтовых, интерстициальных и озерных водах для ответа на вопрос: Являются ли

грунтовые воды, загрязненные человеческими отходами и, связанными с ними биогенными элементами, механизмом запуска избыточного роста бентосной *Spirogyra* в прибрежных районах? Кроме того, мы доказываем, что прогрев воды, связанный с климатическими изменениями, колебания уровня озера и снижение нагрузки выедания [водорослей животными-соскребателями], совместно или по отдельности, вряд ли могут являться главными движущими силами наблюдаемых всплесков развития *Spirogyra*. В заключении мы предлагаем рекомендации по контролю избыточного развития *Spirogyra* в прибрежных водах.

Методы

Исторически сложилось так, что западное побережье озера Байкал изучалось более подробно, чем восточное и, следовательно, первое будет преимущественно использоваться в качестве модельного участка для понимания распределения *Spirogyra*. Места сбора проб указаны на рис. 1.

Сбор образцов

Сбор проб бентосных водорослей происходил обычно с июня по октябрь, в 2013–2016 гг., в основном вдоль западного побережья озера Байкал и вокруг двух островов, Ольхона и Большого Ушканьего (рис. 1). Определены два преобладающих морфотипа *Spirogyra* в местах ее массового развития (рис. S1–S4), и рассчитана их сырая биомасса (г/м²) вдоль трансект (10–15 м длиной), расположенных перпендикулярно береговой линии на глубине 0.5–1.5 м с использованием рамок стандартной площади и stone-unit метода² (Nakashizuka and Stork, 2002; Timoshkin et al., 2015).

Микробиологический анализ

В 2015 г. была рассчитана численность Enterococci и *Escherichia coli* в озерной и интерстициальной воде пляжа перед полевым стационаром Лимнологического института (ЛПИ) в поселке Большие Коты (рис. 1). В 2016 г. определены концентрации тех же двух групп микроорганизмов только в грунтовых водах. В 2015 г. пробы отбирались в июне, августе и сентябре. В каждую дату отбора образцы озерной воды собирали в трех повторностях (каждая объемом 150 мл), используя шприц Жане, у береговой линии озера и снова около озерного дна, но примерно в 10 м в сторону озера от линии берега. На последней точке отбора проб шприцы Жане присоединяли к палке длиной 1.5 м, для придонного отбора воды. Помимо этого, собраны 3 пробы интерстициальной воды (объемом 150 мл каждая) из зоны заплеска пляжа (1 м выше береговой линии) в те же даты сбора. Специально отобрали одну пробу интерстициальной воды шприцом из воды, скопившейся в каждой из трех лунок (примерно 0.3 м глубиной, около 1 м друг от друга), вырытых в зоне заплеска пляжа. В августе 2016 г. пробы грунтовых вод в трехкратных повторностях отбирались шприцом с единственного лизиметра³ (его описание – см.

² Площадь рамки – четверть квадратного метра (для учета площади проективного покрытия), с каждой из указанных глубин отбиралось по 3-5 камней (=stone-unit).

³ Лизиметр – пластиковая емкость, специально устанавливаемая в толще грунта для сбора грунтовых вод.

ниже), поскольку грунтовая вода скопилась только в одном из четырех установленных лизиметров. В оба года исследований все взятые шприцем образцы по очереди сливали в отдельные стерильные стеклянные флаконы (250 мл), которые помещались в термосумку с хладоагентами и там хранились при транспортировке и до проведения лабораторных анализов.

В лаборатории в каждой пробе подсчитывались общее число колиформных бактерий (ОКБ) с помощью метода мембранной фильтрации (мембранный фильтр из нитрата целлюлозы, 0.45 мкм). Колониеобразующие единицы (КОЕ) культивировались в течение 24 часов при 37 °С (Федеральный Центр Санитарной Инспекции Министерства Здравоохранения России, 2004; Государственный стандарт Российской Федерации, 2015). Бактерии далее тестировались на способность к ферментации лактозы до газовых и кислотных конечных продуктов. Выделенные колиформные бактерии далее подвергались биохимическому тесту для подтверждения их принадлежности к термотолерантным бактериям (ТКБ) (Федеральный Центр Санитарной Инспекции Министерства Здравоохранения России, 2004). Обычно, *E. coli* составляет большинство ТКБ и является повсеместно принятым индикатором фекального загрязнения. Термотолерантные *E. coli* также определялись путем фильтрации и концентрирования пробы с использованием селективного агара HiCrome (производство Himedia, № M1571). Фекальные энтерококки определялись мембранной фильтрацией и концентрацией пробы, используя среду Slanetz и Bartley (производство Himedia, № M612), а также агар Bile Esculine Azide (производство Himedia, № M493).

Анализ биогенных элементов (биогенов)

Концентрации биогенных элементов (нитратов, орто-фосфатов и кремния) вычислялись в пробах воды, собранных в 2015 и 2016 гг. перед ЛПС в Больших Котах, но схема отбора проб различалась в разные годы. В 2015 пробы отбирались однократно в августе и один раз в октябре на берегу озера в пределах пятна *Spirogyra* (описание – см. ниже) и на контрольной точке, на удалении 10–15 м, где *Spirogyra* отсутствовала. В обе даты отобрана единичная проба поверхностной воды озера (0.6 л) с пятна *Spirogyra* и контрольной точки с использованием шприца Жане. Также в обе даты и с обеих точек при помощи шприца отбиралась интерстициальная вода в объеме 0.6 л на глубине 3–5 см ниже поверхности озерного субстрата.

В августе 2016 собирали пробы грунтовых, озерных и интерстициальных вод вдоль трансекты, протянувшейся от лизиметра № 3 (описанного ниже) до береговой линии и мелководной зоны (рис. 2В). Отдельно отбирались единичные образцы (0.6 л) следующих проб: грунтовых вод из лизиметра № 3; воды из каждой из двух лунок заплесковой зоны (т.е., лунки № 1 и 2, расположенные в 10 и 1 м выше береговой линии соответственно); озерная вода с береговой линии; интерстициальная поровая вода, извлеченная с глубины 3–5 см ниже поверхности озерного субстрата в точке примерно 10–15 м в сторону озера от береговой линии, где глубина воды была 1 м.

Хотя отбор проб на содержание биогенных элементов в 2015 и в 2016 гг. проводился в одной повторности, интенсивный отбор и анализ проб, проведенных до и

после настоящего исследования, показывает, что коэффициенты вариации концентраций биогенных элементов в анализах озерной воды составляют в основном менее 10% с максимальными значениями, достигающими 20% (Khodzher et al., 2017; Tomberg et al., 2012). Интерстициальные поровые воды, однако, более изменчивы как по средним значениям, так и по коэффициентам вариации, что, вероятно, обусловлено их грунтовым происхождением.

После отбора все образцы воды фильтровались для анализов на биогенные элементы через поликарбонатные мембранные фильтры (0.45 мкм) и анализировались сразу на полевом стационаре. NO_3^- в фильтратах рассчитывалось с использованием методов жидкостной хроматографии высокого разрешения в микроколонках (Baram et al., 1999). Концентрации PO_4^{3-} и Si определяли спектрометром (КФК-3, Россия), применяя колориметрические методики. Колориметрические методики включали метод Денигес-Аткинса с хлоридом олова в качестве уменьшителя PO_4^{3-} (ISO 6878:2004) и комплексный метод кремний-молибденовой кислоты для определения кремния (Boeva, 2009). Уровень точности этих методов составляет 0.01 мг л⁻¹ для N (NO_3^-), 1 мкг л⁻¹ для P(PO_4^{3-}), и 0.1 мг л⁻¹ для Si.

Отбор образцов грунтовых вод и анализ элементного состава грунтовых, озерных вод и почвы

Отбор проб проходил в мае-августе 2016 г. на озере перед стационаром ЛИН в Больших Котах (рис. 1). На этой точке береговой уступ (крутой склон) составляет 3–3.5 м в высоту и состоит из множественных горизонтальных слоев, типичных для аллювиальных почв (рис. 2B–D). Верхний торфяной слой («нулевые» почвенные горизонты; 10–15 см) постепенно переходит в песчано-глинистый горизонт с остроугольными каменистыми фрагментами. Его нижняя часть состоит из тонкого (3–5 см) погребенного гумусного горизонта, переходящего в глинисто-галечные и песчано-галечные осадки, переслоенные тонким охристым субстратом. Пляж, расположенный ниже берегового уступа, 8–10 м в ширину, и его субстрат состоит из валунов, гальки и песка (рис. 2 и 3).

В береговом уступе удалось отобрать грунтовые воды 3.2–5.2 м ниже поверхности почвы. Лизиметры №№ 1–3 помещены в ямы 0.3–0.4 м глубиной у основания берегового уступа (рис. 2C, D). Лизиметр № 4 (примерно 60 м к югу от лизиметра № 3 и за пределами видимости на рис. 2C, D) был помещен у основания 5.2-метрового почвенного профиля. Все лизиметры – модификация лизиметра Шилова Е.И. (Kaurichev et al., 1996). Пробы грунтовых вод в 3-х повторностях ($n = 3$) удалось отобрать из единственного лизиметра № 3 и в июне, и в августе пластиковым шприцом. Эти образцы фильтровались (0.2 мкм мембранными фильтрами) в полипропиленовые пробирки и фиксировались ультрачистой HNO_3 для анализа элементного состава.

Четыре образца озерной воды и воды с заплесковой зоны отбирали в одну и ту же дату в мае, июне, июле и августе. Их фильтровали и фиксировали, как в описании пробоподготовки грунтовых вод. Пробы озерной воды собирали на расстоянии 1 м в сторону озера от береговой линии, и единственный образец из заплесковой зоны был

отобран в каждой из четырех лунок зоны заплеска (например, лунка № 2 на рис. 2В и три другие аналогичные лунки), расположенных в 1 м выше уреза воды.

Из каждой пробы почвы или субстрата получали гранулометрическую фракцию (0.25 мм), пропуская через сито. Суб-образцы высушивались при 105 °С до постоянного веса и в последующем использовались для ацетат-аммонийных вытяжек ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$, pH 6.5), подвижных соединений макро- и микроэлементов (Suturin et al., 2013). Агент экстракции добавлялся в полипропиленовые сосуды с пробами почвы в пропорциях 1:10, пробы встряхивались в течение 3 часов. Затем 14 мл собранной суспензии отфильтровывали (ацетат-целлюлозными мембранными фильтрами с ячейкой 0.2 мкм) в полипропиленовые пробирки.

Элементный состав грунтовой, озерной воды и почвы, и вытяжки субстратов определялся с помощью ICP-MS. Анализ выполнялся на Agilent 7500ce масс спектрометре (Agilent Technologies) с квадрупольным масс-анализатором в Центре Общего пользования «Ультра-микроанализ» (Лимнологический Институт СО РАН). Прибор калибровался «тоном» стандартного решения (MECS-2A, Agilent), содержащим Li, Be, Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Rb, Sr, Ag, Cd, Cs, Ba, Tl, Pb, Th, и U. Точность определений оценивалась с использованием стандартного образца глубинной байкальской воды (Suturin et al., 2003), который измерялся совместно с каждой серией анализируемых проб. Относительное стандартное отклонение (RSD) составляло 5% для Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr, I, Ba, и U, и 5–10% для Co, Ni, Pb.

Измерения уровня воды и температуры

Экстремальные значения (самые высокие и низкие показатели) уровня воды озера Байкал в определенный год с 1960 до 2017 гг., а также среднемесячные значения температуры воздуха и поверхности воды (°С) за 1940–2016 гг. получены из РОСГИДРОМЕТа (Гидрометеорологическая Служба Российской Федерации, Иркутское Отделение). Автоматический регистратор уровня воды РОСГИДРОМЕТа, расположенный в пос. Листвянка и контролируемый, непрерывно измеряет и регистрирует значения уровня воды в Байкале. По этим значениям были оценены суточные значения, а затем определялись экстремальные показатели. Средние температуры рассчитаны по данным, собранным с шести гидрометеорологических станций: г. Иркутск (60 км к северо-западу от южной части озера Байкал) и пять станций на побережье озера, включающих исток реки Ангары, прибрежные населенные пункты: г. Бабушкин, поселки Танхой, Большое Голоустное и Листвянка (рис. 1). Показатели температуры поверхности воды мая-сентября (только прибрежные станции) и их 5-летние сглаженные значения рассчитывались по среднемесячным значениям для каждой станции. Как часть исследования развития *Spirogyra* на полевом стационаре в Больших Котах, также регистрировалась температура воды каждые 30 мин в июле-октябре в 2015 и 2016 гг., используя автономный программируемый датчик (Tid-Bit Stow Away Logger), помещенный в 15 м к северу от пятна *Spirogyra* (см. ниже), но на глубине воды (0.2–0.3 м) и равной глубине воды над самым пятном. Значения температуры воды усреднялись по месяцам. Также в рамках исследования директор стационара ЛИН СО РАН предоставил данные о ежемесячном количестве человеко-дней (за период май-октябрь) в 2015 и 2016 гг. Человеко-дни

рассчитывались путем суммирования числа дней, в течение которых каждый человек присутствовал на стационаре ЛИН СО РАН в определенный месяц 2015 и 2016 гг.

Результаты и обсуждение

Пространственно-временное распределение *Spirogyra* вдоль западного побережья озера Байкал

Существующие на сегодняшний день схемы пространственного распределения *Spirogyra* в прибрежной зоне озера Байкал предоставляют убедительную концепцию причины недавних всплесков развития *Spirogyra*. Наиболее массовое развитие *Spirogyra* (так называемый “морфотип 1”, см. ниже) проявилось вблизи прибрежных городов и поселений таких, как Большие Коты, Большое Голоустное и т.п. (рис. 1). Морфология, распределение и экология доминирующих морфотипов *Spirogyra* 1 и 2 описаны в электронном приложении к данной статье (ESM рис. S1–S4).

Нами отмечено два типа пятен *Spirogyra* в прибрежной зоне Байкала в зависимости от их размера и глубины разрастания. Первый тип, крупные пятна (длиной 50–1000 м и более) типичны для прибрежных районов, окружающих поселения. Как правило, они располагаются на глубинах 0.5–2 м. Второй тип, пятна гораздо меньшего размера (длиной 0.2–2.0 м), были обнаружены вблизи единичных домов и туристических палаток около береговой линии на глубинах 0.2–0.3 м. Пятна 2 типа были обнаружены только напротив стационара Лимнологического института (здесь и далее – “ЛПС пятно”) либо в бухте Емельяниха (см. ниже). Интересно, что сезонное развитие и динамика *Spirogyra* (“морфотип 1”) вблизи поселений, по-видимому, связаны с сезонным притоком жителей и гостей в эти районы. Мы используем поселение Большие Коты в качестве показательного примера. В этой деревне насчитывается только 30 постоянных жителей. Тем не менее, летом (особенно в июле и августе) количество людей существенно увеличивается и включает несколько сотен студентов Иркутского Госуниверситета, проходящих летнюю полевую практику, многочисленных студентов [\[и участников проходящих здесь\]](#) региональных и международных летних школ, тысячи туристов, которые посещают это живописное место. К сожалению, ни Восточно-Сибирское пароходство, обеспечивающее регулярное сообщение судами на воздушной подушке между Иркутском и Большими Котами, ни хозяева многочисленных частных гостиниц не согласились дать статистику [\[продажи билетов или\]](#) посещаемости. Поэтому точное число посетителей [\[пос. Бол. Коты\]](#) оценить невозможно. Сезонная динамика и пространственное распределение спирогиры, в основном «морфотипа 1», в заливе возле этого поселения показаны на рис. 4, и ESM рис. S5–S6. В июне видовая структура и распределение макрофитов вблизи побережья в пределах зон 1 и 2 [\[=первого и второго растительных поясов\]](#) (см. пояснения, [Timoshkin et al., 2016](#)) является типичной для открытого Байкала (ESM рис. S5A, B: в основном *Didymosphenia*, *Ulothrix*, *Chrysophyceae* spp.) ([Izhboldina, 2007](#)), а *Spirogyra* почти отсутствует. В июле появляется *Spirogyra* «морфотип 1» в небольшом количестве, находки приурочены к деревянным частям двух лодочных пирсов (рис. 4, фото вверху справа). Оба пирса расположены напротив двух разных полевых станций (=стационаров): ЛПС (рис. 4, пирс А) и стационара Иркутского Госуниверситета (рис. 4, пирс В). Обе

станции интенсивно используются с июня по сентябрь, но не действуют (или действуют крайне редко, от 5 до 7 человек в месяц) в зимний период. К августу площадь распространения водорослей увеличивается, составляя два четко обозначенных пятна, каждое длиной по 125–150 м вдоль береговой линии (ярко-зеленые пятна на рис. 4, фото посередине), в которых сырая биомасса *Spirogyra* составляла $\geq 100\text{--}200 \text{ г м}^{-2}$ при 80–100% площади проективного покрытия в пределах каждого пятна на глубине 1–1.5 м (рис. 4С, D). В сентябре–октябре пятна соединялись, образуя сплошное пятно *Spirogyra*, которое простиралось на 600–700 м вдоль береговой линии (рис. 4, фото снизу). Сырая биомасса *Spirogyra* в центре старых пятен выросла до $500\text{--}600 \text{ г м}^{-2}$ (зеленые стрелки на рис. 4С, D), которая была в 1.5–2 раза больше, чем биомасса водорослей между пятнами и по их периферии (черно-желтая штриховка, рис. 4, фото левое снизу). Никаких других пятен *Spirogyra* вблизи Больших Котов кроме тех, которые охарактеризованы выше, за период с 2012 по 2016 гг. обнаружено не было.

В заключение, интенсивный рост *Spirogyra* ‘морфотипа 1’ начинался в середине лета с максимумом развития осенью в обоих поселениях⁴ во время экологического кризиса (2011–2016 гг.). Участки побережья, расположенные к северу или югу от этих поселений, на протяжении исследуемого периода были свободны от *Spirogyra*. Важно, что ни одно из этих поселений не имеет централизованной системы очистки сточных вод. Вместо этого, приток отходов из частных домов и многочисленных отелей, расположенных в 20–300 м от береговой линии, стекает в неизолированные сточные ямы, откуда он, предположительно, поступает путем пассивной фильтрации сквозь грунт в прибрежную зону озера, где, очевидно, и стимулирует интенсивный рост *Spirogyra* ‘морфотипа 1’. В обоих случаях пространственное распределение *Spirogyra*, по-видимому, характеризовало прибрежные зоны, находящиеся под воздействием сточных вод. Эти вспышки развития, очевидно, связаны с количеством человеко-дней (см. ниже), которое обычно достигает своего максимума в августе, но сильно сокращается с октября-ноября. Подобное развитие *Spirogyra* ‘морфотипа 1’ происходит вокруг большинства поселений с сезонной рекреационной активностью; однако, водоросли остаются сравнительно обильными круглый год в нескольких местах (прибрежная зона поселка Листвянка, города Байкальск, окрестности устья реки Тья, рис. 1) с круглогодичным поступлением [избыточных] биогенов.

Пространственное распределение *Spirogyra* вокруг островов озера Байкал

Согласно одной из возможных рабочих гипотез, основными движущими силами массового развития спирогиры в Байкале могли бы быть колебание [в частности - понижение] уровня воды и [или повышение] температуры воды, а не [поступление избыточных] биогенных элементов в результате человеческой деятельности. Эта гипотеза проверена нами на примере распределения водоросли в пределах 2 островов. Если бы эта гипотеза была верна, то пространственное распределение *Spirogyra* должно было бы быть

⁴ Имеются ввиду поселки Бол. Коты и Бол. Голоустное.

непрерывным и однородным⁵. Два острова, Ольхон и Большой Ушканий (рис. 1), удаленные друг от друга всего лишь на 74 км, очевидно, испытывают сходные колебания уровня воды и температуры воды из-за их близкого расположения. Кроме того, оба острова расположены на малом [минимальном] удалении (2 и 7 км, соответственно) от береговой линии самого озера, а эти расстояния не должны ограничивать распространение *Spirogyra*, поскольку она способна производить [микроскопические планктонные] зигоспоры, а также [распространяться] свободноплавающими нитями. Рекреационная активность на этих островах, однако, сильно различается. Остров Ольхон, самый крупный остров Байкала (730 км²), ежегодно посещают $\geq 800,000$ туристов, в основном летом (Tokareva, 2016); тем не менее, с 2014 г. многие гостиницы заняты круглый год (Petrova N.P., устн. сообщ., Общество «Наш Байкал», 2017). Кроме того, на этом острове 1651 жителей, распределенных по девяти малым поселкам, где Хужир (рис. 1, 5) является крупнейшим, с постоянным населением в 1350 человек (администрация Ольхона Иркутского района, 2016). В отличие от этого, более маленький Большой Ушканий остров (9.4 км²) является частью федерального природного заповедника со строгими ограничениями количества посетителей. Здесь постоянно проживает только одна семья лесника, охраняющая архипелаг.

Малонаселенный Большой Ушканий остров остается свободным от масс *Spirogyra*. Напротив, мы наблюдали массовое развитие *Spirogyra*, распределение которой было пятнистым, вдоль побережья острова Ольхон. Сырая биомасса водоросли, ее сезонное развитие и пространственное распределение были аналогичны тому, что описано для Больших Котов и Большого Голоустного (см. выше). Наиболее обильное ежегодное массовое развитие за три года наблюдений на острове Ольхон было отмечено в маленькой бухте Шаманка, граничащей с поселком Хужир (100–210 г м⁻², 80–100% площади проективного покрытия на глубине 0.5–1.5 м) и в бухте Перевозная, через которую осуществляется регулярное сообщение с островом посредством регулярной паромной переправы. Наименее обильное развитие произошло возле мыса Харин-Ирги (0–20% площади проективного покрытия на тех же глубинах), [в одноименной бухте] популярном месте для туристических кораблей и других судов (рис. 1, 5).

Еще одно исследование проводилось в сентябре 2016, когда периметр побережья острова Ольхон был разделен на 10 станций (рис. 5). Результаты по станциям Хужира и Харин-Ирги показали количество водорослей (100–135 г м⁻²; рис. 5, красные кружки), аналогичное количеству, обнаруженному в Больших Котах и Большом Голоустном, в то время как незначительное число водорослей появлялось на нескольких удаленных станциях (Зантык на западном и Халзин на восточном побережье; рис. 5, зеленые кружки). Важно отметить, что северо-западное и почти все восточное побережье острова Ольхон было свободным от *Spirogyra* (рис. 5, голубые кружки), а эти районы в основном не доступны для туристов, и постоянные жители здесь не находятся. Сезонное развитие *Spirogyra*, наблюдаемое в заливе Шаманка на острове Ольхон с 2014 по 2016 гг., было

⁵ [Поскольку оба острова имеют небольшие размеры, то влияние таких факторов, как колебание уровня или повышения температуры было бы явно одинаковым и равномерным на всем протяжении прибрежной зоны этих островов.]

сходным с тем, что отмечалось в Больших Котах и Большом Голоустном (Южная котловина). И вновь мы подчеркиваем, что на всех выше перечисленных местах, доминировала *Spirogyra* «морфотип 1». Водоросль в начале лета в основном отсутствовала, но достигала максимума обилия в сентябре.

Таким образом, наши наблюдения распределения *Spirogyra* вдоль побережий двух островов не подтверждают гипотезы о том, что уровень воды и потепление климата являются движущими силами массового развития *Spirogyra* в Байкале, т.к. эти факторы проявились бы одинаково [вдоль побережья этих островов]. Наоборот, *Spirogyra* появлялась [и развивалась] главным образом вблизи поселений, бухт и центров рекреационной активности, и это заставляет предполагать, что антропогенная эвтрофикация является основной причиной ее массового разрастания.

Полевые наблюдения на стационаре Лимнологического института (ЛПС) в Больших Котах, а также – бухте Емельяниха (западное побережье Южного Байкала)

В 2015–2016 гг. мы наблюдали за развитием нескольких небольших по размеру пятен *Spirogyra* вблизи побережья озера, подтверждающие наши предварительную гипотезу о том, что грунтовые воды, загрязненные неочищенными стоками, стекают в мелководную прибрежную зону озера, где и питают массовое разрастание *Spirogyra*. Исследования прибрежных сообществ фитобентоса, выполненные в 2015–2016 гг. в заливе Большие Коты предоставили серьезные данные для оценки этой гипотезы. Светло-зеленое пятно водорослей (здесь и далее: «пятно ЛПС»), круглое по форме и приблизительно 2 м в диаметре, было обнаружено в конце июля 2015 г. на дне озера, примерно в 5 м от береговой линии и на глубине 0.3 м (рис. 6–7, ESM-рис. S7). С помощью микроскопического анализа было определено, что нитчатые водоросли, составляющие это пятно, принадлежали преимущественно к *Spirogyra* ‘морфотип 1’, с небольшой примесью нескольких других морфотипов. Образцы макрофитобентоса, собранные в 0.6–1.0 м к северу, востоку, югу и западу от пятна, не содержали каких-либо нитей *Spirogyra* (рис. 6С). Интересно, что подобное пятно *Spirogyra* образовалось примерно в том же месте [и на следующий год,] в июле-августе 2016 г.

Вследствие того, что это единичное изолированное пятно разрослось непосредственно перед ЛПС (рис. 1, 6, ESM-рис. S9), мы предположили, что сточные воды из туалетов, сауны, кухни и других объектов ЛПС перемещались с грунтовыми водами в прибрежную зону (рис. 3). Все эти строения снабжены необлицованными выгребными ямами, не изолированными от окружающей почвы. Концентрации фекальных бактерий стали важнейшим свидетельством в подтверждение этой гипотезы (рис. 8). Чрезвычайно высокие концентрации фекальных бактерий (*Enterococcae*: $>12,000$ КОЕ 100 мл⁻¹), превышающие показатели в незагрязненных районах побережья приблизительно в 1000 раз, были обнаружены в пробах интерстициальных вод, в лунке напротив ЛПС в августе 2015 г. Для сравнения, концентрации *Enterococcae*, обнаруженные в образцах воды из ямок заплесковой зоны удаленного и сравнительно девственного мыса Большой Солонцовый 26 сентября, 2015 составляли 0 КОЕ 100 мл⁻¹ и 19 июня, 2016 – 10 КОЕ 100 мл⁻¹. К сентябрю эти концентрации напротив ЛПС снижались почти в шесть раз по

сравнению с августом, но эти концентрации (*Enterococcus* ca. 2000 КОЕ 100 мл⁻¹) были почти на 3 порядка выше концентраций, наблюдаемых в незагрязненных местах побережья озера (например, 0–5 КОЕ 100 мл⁻¹ из лунок заплесковой зоны на мысе Большой Солонцовый в течение летне-осеннего периода 2015–2016 гг.; Мальник В.В., устн. сообщ., Лимнологический институт СО РАН, 2017; Timoshkin et al., 2012b).

Результаты гидрохимического анализа поверхностных и придонных вод в пределах «пятна ЛПС» четко показывают, что локальный сток грунтовых вод насыщен биогенными элементами (Tomberg et al., 2012) (рис. 6; таблица 1). Важно отметить, что грунтовые и поверхностные воды небольшого [временами пересыхающего] ручья в пределах этой долины насыщены Si (Tomberg et al., 2012). Очевидно, что *Spirogyra* не реагирует на воды, обогащенные Si, т.к. мы не наблюдали никаких пятен *Spirogyra* в прибрежной зоне озера Байкал напротив устья ручья на протяжении 2010–2016 гг., а маленькие пятна *Spirogyra* (“морфотип 2”) редко наблюдались в нижней части потока. Поскольку полевой стационар снабжается грунтовыми водами из двух буровых скважин по 20 м глубиной каждая, эти воды также были насыщены Si. Следовательно, сточная вода, насыщенная Si из полевого стационара, потенциально может стекать вместе с грунтовыми водами в зону заплеска и мелководную зону озера. Так и оказалось на самом деле: концентрации Si в образцах интерстициальной воды [из лунок] достигали уровня в 6 мг л⁻¹. Судя по высоким концентрациям Si в интерстициальных поровых водах, взятых из центра «пятна ЛПС» (2.05 мг л⁻¹, таблица 1) по сравнению с низкими концентрациями Si, измеренными в интерстициальных поровых водах, взятых в контрольной точке (0.14 мг л⁻¹) и на прибрежной линии (0.15 мг л⁻¹), можно сделать обоснованный вывод, что сточные воды с полевого стационара [действительно] поступали в ту область дна озера, где развивалось «пятно ЛПС». В августе 2015 г. концентрации Si в образцах интерстициальной поровой воды, отобранной шприцом из центра «пятна ЛПС», были в 15 раз выше, чем в пробах интерстициальной поровой воды, взятой из контрольной точки без *Spirogyra* (на удалении в несколько метров). Даже образцы поверхностной воды приустьевой зоны, отобранной в августе над «пятном ЛПС», показали концентрации Si в 1.5 раза выше, чем концентрации Si в воде из контрольной точки. Важно, что концентрации фосфатов и нитратов в августе в поровой воде пятна *Spirogyra* [«пятно ЛПС»] были соответственно в 1.5 и 5 раз выше, чем аналогичные значения, измеренные для поровой воды из контрольной точки (таблица Table 1). Даже в октябре 2015 г., когда пятно *Spirogyra* оказалось выше береговой линии в заплесковой зоне, вследствие того, что уровень озера был естественно ниже уровня августа (ESM-рис. S9), концентрации кремния и нитратов в 1.6 и 2 раза выше соответственно в поровой воде пятна, чем в поровой воде с контрольной точки (таблица 1). Интересно [подчеркнуть], что пространственно-временное распределение *Spirogyra* и значения ее сырой биомассы из [маленького, всего 2 м в диаметре] «пятна ЛПС» вблизи пирса В (рис. 4, 7 и ESM-рис. S6C–F) были сходны с этими показателями [характерными для обширных районов массового развития спирогиры, простирающихся на сотни метров, в самих Больших Котах,] в 560 м к северу от «пятна *Spirogyra* ЛПС» и напротив поселка Большое Голоустное (рис. 1).

Кроме того, было обнаружено несколько пятен с обильно растущими нитчатыми зелеными водорослями [=спирогирой] в прибрежных лужах выше береговой линии на глубине 0.1–0.2 м, 15 сентября 2015 г. в заливе Емельяниха (рис. 1). Среда обитания пятен этих водорослей была сходна со средой «пятна ЛПС», и состав водорослей был идентичным, состоял из *Spirogyra* «морфотип 1», который всегда прикрепляется к камням (ESM рис. S8A–C). Удивительно, что в этом районе самой прибрежной зоны озера Байкал (от береговой линии, 0.5 до 1.5-м глубиной, ESM-рис. S8D–E) массового развития *Spirogyra* обнаружено не было. Мы не могли дать этому [явлению] адекватного объяснения до тех пор, пока не узнали, что данная конкретная область бухты Емельяниха является популярным местом для путешественников, ставящих здесь палатки, но в этой зоне отсутствуют какие-либо общественные туалеты либо приспособления для мытья. В заключении делаем вывод, что *Spirogyra* «морфотип 1», по-видимому, является очень чувствительным биологическим показателем бытовых отходов человеческой деятельности, поскольку она массово развивается в местах рекреационной активности.

Анализ грунтовых вод

Выгребные ямы, в которые поступают необработанные сточные воды в поселке Большие Коты и ЛПС, как правило, 1.5–2 м глубиной и не имеют облицовки или крышки. Следовательно, бытовые отходы сбрасываются в почвенный горизонт С, состоящий из смеси гравий\песок\камни с высокой проницаемостью. Несколько выгребных ям, расположенных в 60–120 м от береговой линии и связанных со строениями ЛПС, находились вблизи того места, где отбирались пробы грунтовых вод (рис. 2). [Из всех 4-х установленных нами лизиметров] грунтовые воды регулярно скапливались только в лизиметре № 3 (рис. 2В, С), [установленным] перед предполагаемым «маршрутом» грунтового стока. Все другие лизиметры оставались пустыми в течение летних месяцев исследований. В мае 2016 г., после таяния снежного покрова, максимальные концентрации подвижных компонентов Na, Cl и S в нижнем горизонте [почвенного] профиля 3 были в 2.5–238 раз выше тех, что были обнаружены в почвенных профилях 1 и 2, расположенных в нескольких метрах к северу от профиля 3 (рис. 2В, С; таблица 2). Прибывающие сточные воды, смешивающиеся с талой водой, дождевой водой или их смесью, по-видимому, являются источником высокого содержания этих химических элементов, поскольку соединения Na, Cl, и S в высоких концентрациях характерны для мочи и фекалий (Berezov and Korovkin, 1998; Zbarsky et al., 1965). Высокие концентрации подвижных элементов Al, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, I, и Ba также проявлялись в нижнем горизонте профиля № 3 (таблица 2). Сходные тенденции к повышенным концентрациям химических элементов (кроме хорошо растворимых соединений Na, Cl, S, I) были также обнаружены в почвах этого профиля в августе 2016 г. Элементы P и K также значительно насытили нижний [почвенный] горизонт профиля 3 к концу летнего сезона. Такие изменения свидетельствуют об интенсивном притоке Na, Cl, S, и I, а также постоянном поступлении Al, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ba, P, и K и их адсорбции мелкими почвенными частицами. Концентрации Al, Si, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, и Pb в грунтовых водах профиля 3 оказались на порядок выше, чем [аналогичные] концентрации в интерстициальных поровых и прибрежных водах. Грунтовые воды также были существенно насыщены Cl, K, Zn, Ba, и P.

Санитарно-микробиологические и гидрохимические данные также подтверждают эти результаты и выводы, полученные с помощью ICP-MS. Высокие средние концентрации *E. coli* и Enterococcae (1580 и 2140 КОЕ 100 мл⁻¹, соответственно) наблюдали в пробах воды из лизиметра № 3 в августе 2016 г., после трех дней непрерывного дождя. *Escherichia coli* выжила после прохождения примерно 120 м под землей из предположительного источника [=туалета] и достигла верхней границы пляжа (конец профиля 3). Сходным образом сравнительно высокие концентрации N (NO₃⁻) и P(PO₄³⁻) были обнаружены на дне берегового уступа в лизиметре № 3 и лунке № 1, но они постепенно уменьшались по мере продвижения к самому озеру (рис. 2В). Следует отметить особо, что концентрация фосфатов в воде лизиметра была в 4–8 раз выше, чем их концентрация в интерстициальной придонной воде озера и воде уреза воды соответственно. В этот же период времени концентрация NO₃⁻ в озере была ниже предела чувствительности метода, а в пробах из лизиметра № 3 – в 3–15 раз выше, чем в лунках № 1 и 2 (рис. 2А, В). Низкие концентрации биогенных элементов в прибрежной зоне озера позволяют предположить, что для массового цветения *Spirogyra* “морфотип 1” не нуждается в очень высокой концентрации биогенных элементов [в толще воды], напротив, для этого нужно постоянное поступление стоков со сравнительно небольшим количеством биогенных элементов.

По данным анализа лизиметрических проб воды и образцов *Spirogyra*, собранных перед ЛПС, можно сделать несколько выводов. Элементный, микробиологический и гидрохимический анализы образцов воды из лизиметра № 3 позволяют предположить, что водоносный горизонт расположен непосредственно на (или рядом) с виртуальной трансектой (рис. 3). Поток, очевидно, протекает на глубине 3.5–4 м в почве, а вода, собранная из него, насыщена Na, Cl, S (типично для грунтовых вод, загрязненных фекальными стоками), Si (типично для грунтовых вод этой местности), и другими элементами. Биогенные элементы и бактерии-индикаторы фекального загрязнения также продемонстрировали высокие концентрации. [Очевидно, что] «Пятно *Spirogyra* ЛПС» развивалось непосредственно на конечной точке трансекты, где происходит разгрузка грунтовых вод, насыщенных стоками, в прибрежную зону озера. Наши наблюдения на месте совместно с другими наблюдениями показали, что конкретные морфотипы *Spirogyra* могут быть чувствительными биологическими показателями не должным образом очищенных сточных вод (фекальное загрязнение), повышенного содержания биогенных элементов, либо того и другого (Hainz et al., 2009; Schneider and Lindstrom, 2011; Smith and Ludwig, 1968). Средняя сырая биомасса (300–600 г м⁻²) и сезонная динамика [спирогиры] в этом изолированном пятне оказались сходными с аналогичными показателями, которые были обнаружены для более крупных пятен спирогиры (1–2 км длиной) в заливе Большие Коты (рис. 4), а также в заливе Лиственничный и вблизи поселка Большое Голоустное.

[Таким образом,] Пространственное распределение и сезонная динамика «пятна *Spirogyra* ЛПС», вместе взятые, а также их взаимосвязь с поступлением сточных вод, попадающих в прибрежную зону вместе с грунтовыми водами, следует рассматривать в качестве модели для объяснения более крупных случаев массового развития *Spirogyra*, ежегодно наблюдаемых вблизи самих Больших Котов, Большого Голоустного и других поселений. Во всех этих местах обилие *Spirogyra* начинало возрастать с июля по август,

когда посетители и туристы прибывают в эти поселки. Поскольку большинство гостиниц и домов не имеет септических емкостей, большой объем стока с многочисленных сооружений пассивно проникает через почву и стекает в прибрежную зону озера Байкал, делая возможным появление пятен *Spirogyra* «морфотипа 1» гораздо больших размеров, дающих максимум роста осенью. В более широком смысле в нашей работе подчеркивается, что прибрежная линия и литоральная зона крупных водных экосистем (например, больших озер, океана) первыми реагируют на воздействие наиболее концентрированных источников загрязнения, расположенных на суше (Schneider et al., 2014), и это именно то место, где проблемы эвтрофикации наиболее острые. Некоторые русские лимнологи высказывались с 1998–2002 гг. о том, что озеро Байкал обладает иммунитетом к эвтрофикации, т.к. в его огромном объеме растворятся все [излишние] биогенные элементы [, которые потенциально могут попасть в озеро] (Grachev, 2002; Kozhova and Izmet'seva, 1998). Сходное неоправданное предположение, касающееся уязвимости океанов к эвтрофикации и другим формам загрязнения, существовало среди ученых, изучавших моря и океаны в первой половине XX века. Хотя формально не выраженное, это отношение было аналогично часто повторяемому лозунгу «решение проблемы загрязнения это растворение». Сейчас, однако, эвтрофикация побережий и, как результат, появление мертвых зон в океане признается в глобальном масштабе (Diaz and Rosenberg, 2008; Rabalais et al., 2002), и океанографы, работающие на море за пределами континентального шельфа, признают, что [в морях и океанах] не существует районов, обладающих иммунитетом к воздействию избыточных биогенных элементов, производимых человеком (Karl and Tien, 1997; Van Dover et al., 1992). Этот же вывод справедлив и для озера Байкал.

Таблица 1. Содержание биогенных элементов в поровой воде и прибрежной воде озера в радиусе «пятна спирогиры ЛПС» и фоновом участке (несколько метров от пятна), 2015 г.

	Si		P(PO ₄ ³⁻)		N(NO ₃ ⁻)	
	август	октябрь	август	октябрь	август	октябрь
Урез (фон)	0,15	0,39	0,002	0,003	0,02	0,04
Дно (фон)	0,14	0,41	0,004	0,006	0,01	0,03
Над «пятном ЛПС»	0,23	0,32	0,005	0,002	0,02	0,03
Поровая из «пятна ЛПС»	2,05	0,67	0,006	0,005	0,05	0,06

Таблица 2. Элементный состав (мкг/л) (средние значения ± стандартные отклонения) ацетатно-аммонийных вытяжек грунтов (ААВ) и байкальской воды прибрежной зоны, прилегающей к территории стационара ЛИН СО РАН. Анализ выполнен на масс-спектрометре Agilent 7500се фирмы Agilent Technologies с квадрупольным масс-анализатором в Центре коллективного пользования “Ультрамикроанализ” при ЛИН СО РАН (n = число проб)

Эле- мент	26.05.16.			28.08.16.			Вода из лизиметра (n=3)		** Разрез 2 (n=1)	ААВ грунтов из лунок зоны заплеска (n=5)	Вода из лунок зоны заплеска (n=16)	Вода в 1 м от уреза (n=16)	ААВ донных грунтов, (глубина 1,5 м) (n=3)
	ААВ грунтов* (n=1)												
	Номер разреза						Разрез 3						
	1	2	3	2	3	4	30.06.16.	28.08.16.	28.08.16				
Na	1530	1670	4100	1030	980	2500	1570±370	1670±60	5100	880±280	3150±200	3540±100	875±210
Mg	38000	41000	46000	30000	50000	53000	2670±60	4600±60	8500	30000± 9000	3050±900	3220±60	20750±70 0
Al	4.2	4.20	10.8	5.30	13.6	1.67	170±10	1500±90	1200	1.89±0.33	160±30	6.50±0.10	5.55±1.70
Si	1510	980	1100	2000	1380	2200	3800±60	5900±60	7800	1080±300	2200±400	390±120	1070±320
P	<7	<7	12.3	<7	57	12.9	98.3±3.5	53.0±10	<30	10.3±3.85	<30	36.0±1.8	40±20
S	600	<500	21000	<500	<500	1110	2160±270	1230±60	9900	<500	2000±200	1580±90	630±130

Cl	<40	60	9300	107	106	55	1720±420	1600±60	8800	<40	<1000	<1000	40±20
K	3800	6200	4100	4400	11000	4000	1740±400	2100±230	1400	4600±1800	1030±100	890±90	2900±800
Ca	320000	240000	200000	190000	210000	340000	7100±200	11000±300	21000	186000±60000	12950±400	14600±1200	164500±6000
Mn	41	72	460	31	660	200	320±10	54.0±10	25.0	84.0±30	2.58±0.75	0.23±0.05	160±90
Fe	48	47	48	47	60	46	690±10	1420±90	930	49.0±14.1	110±30	45.0±4.2	48.5±2.5
Co	0.87	0.95	3.60	0.66	2.90	0.96	4.33±0.12	0.87±0.08	0.82	0.67±0.15	0.091±0.03	0.033±0.010	1.01±0.27
Ni	1.24	3.50	10.8	1.70	8.2	6.9	4.70±0.26	4.50±0.20	3.60	1.70±0.40	0.29±0.06	0.32±0.03	2.15±0.50
Cu	1.32	2.50	4.20	1.63	5.00	1.59	6.90±1.10	6.70±0.30	5.60	1.53±0.60	1.19±0.34	0.58±0.06	3.35±0.50
Zn	0.56	1.29	2.40	0.55	1.80	<0.4	13.9±7.1	11.8±0.80	5.20	<0.4	2.01±0.70	1.60±0.55	<0.4
Sr	2100	1790	940	2600	1840	2200	49.3±1.2	78.0±0.6	125	1400±300	75.0±9.0	100±10	1610±650
I	2.9	3.80	14.5	4.60	4.7	4.4	4.57±0.06	2.00±0.06	8.70	5.5±0.77	2.70±0.25	1.62±0.27	4.90±0.90
Ba	830	570	1740	860	2100	940	8.13±0.12	25.0±0.47	11.5	910±320	9.30±0.85	9.10±1.77	1310±500
Pb	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.29±0.08	1.48±0.09	1.39	<0.05	0.13±0.06	0.050±0.020	<0.05
U	1.33	1.14	0.73	1.81	0.72	0.74	0.17±0.003	0.12±0.06	0.32	1.80±0.60	0.34±0.05	0.54±0.09	0.78±0.26

* - пробы грунтов отобраны из почвенных разрезов 1, 2, 3, 4 у подножия берегового уступа на глубине 100–130 см от поверхности пляжа.

** Элементный состав воды, просочившейся во время сильного прилива через толщу пляжного грунта до основания берегового уступа (стационар ЛИН, 28.08.16 г.).

Альтернативные движущие силы

Результаты, показанные здесь и в других работах (Khodzher et al., 2017), четко свидетельствуют о воздействии поступления [в экосистему] биогенных элементов, как главного фактора, приводящего к взрывному развитию *Spirogyra*. Это увеличение биогенной нагрузки наиболее вероятно вызвано интенсификацией туризма и нелегальным строительством вблизи прибрежной зоны (Chernova, 2017; MacFarquhar, 2017). [Конечно, нельзя полностью исключать, что] Растущие вбросы биогенных элементов могут синергетически взаимодействовать с другими альтернативными движущими силами, в частности, растущей температурой [поверхности воды] озера, описанной ниже. [Однако,] Исторические данные, а также сведения из литературы свидетельствуют о том, что влияние других альтернативных факторов [на массовое развитие спирогир в Байкале] маловероятно. Среди этих факторов, мы особо рассмотрим [такие часто упоминаемые факторы как] колебания уровня воды в озере и сокращение нагрузки выедания [со стороны беспозвоночных, питающихся фитобентосом].

Потепление климата

Рост температуры воды озера, связанный с современным изменением климата, отмечается в оффшорной пелагической зоне озера Байкал многими группами ученых (Hampton et al., 2008; Katz et al., 2011; Shimaraev and Domysheva, 2013; Shimaraev et al., 2002; Sizova et al., 2013; Troitskaya et al., 2003), а некоторыми исследователями установлена положительная связь между температурами поверхности воды в мае-октябре и биомассой байкальского фито- и зоопланктона (Afanasyeva and Shimaraev, 2006; Shimaraev et al., 1994). Однако, эти корреляции установлены для долгосрочных трендов изменения температуры [поверхностных вод озера на протяжении нескольких десятков лет], в то время как для выяснения возможной взаимосвязи между биомассой *Spirogyra*⁶ и температурой больше всего подходит временной интервал последних 10–13 лет. Удивительно, но тренд температуры поверхностной воды в южной котловине вблизи областей массового развития *Spirogyra* (залив Лиственничный, залив Большие Коты, пос. Большое Голоустное) оказался отрицательным на всех трех метеорологических станциях вдоль западного побережья с 2000 по 2016 (–0.2 до –0.3 °C за 10 лет) (рис. 9). И наоборот, температурные тренды поверхностных вод на станциях восточного побережья положительны (0.6 до 1 °C за 10 лет) (рис. 10). Такие различия [температурных трендов прибрежных вод у разных берегов озера] могут быть обусловлены локальными [абиотическими] факторами, например: степенью выраженности мелководной зоны, близостью дельты реки Селенга (восточное побережье), особенностями вертикального переноса вод и т.п. Таким образом, по-видимому, не существует четкой связи между температурными тенденциями поверхностной воды и пространственной структурой массового развития *Spirogyra*. Дополнительная информация и аргументация представлены в виде ESM (рис. S10).

⁶ Т.е. - появлением и массовым развитием водоросли в Байкале, которое датируется примерно 2010-2011 гг.

Колебания уровня озера

Уровень воды в озере ежегодно колеблется (уменьшается и увеличивается), обычно в пределах около 1 м. Причиной тому является изменение поступления воды в озеро (например, через выпадение осадков и водотоки) относительно ее выноса из озера (посредством испарения и стока, связанного с работой Иркутской гидроэлектростанции). Соответственно [этим колебаниям, избыточные], биогенные элементы могут поступать в прибрежную зону как из самого озера благодаря пограничному перемешиванию и активности сейш (Zohary and Ostrovsky, 2011), так и из заплесковой зоны посредством «эффекта Бирча» (Jarvis et al., 2007; т.е. – высокими темпами минерализации при неоднократном увлажнении органических субстратов). Однако, исторические сведения по колебаниям уровня воды в озере Байкал опровергают утверждение, что этот фактор может инициировать современное массовое развитие *Spirogyra*. Уровень озера колебался в пределах 3 м с периода 1730 г. (когда были выполнены первые замеры) до конца 1950-х годов (Galazyi, 1987). После строительства плотины Иркутской гидроэлектростанции на единственном стоке из озера, реке Ангара, уровень воды озера Байкал вырос в 1963 г. на 1.36 м, но постепенно сокращался до 0.8 м. В соответствии с требованиями закона Российской Федерации (Постановление Правительства Российской Федерации, 2001), предел [колебания] уровня воды озера также уменьшился до 1 м (рис. 11). Обогащение прибрежной зоны биогенными элементами, вероятно, происходило во время и сразу же после сооружения плотины. Тем не менее, никакого вреда озерной экосистеме, сопоставимого с современным массовым цветением водорослей и гибелью губок (Timoshkin et al., 2016), ни в тот период, ни в последующие годы до начала вспышек массового развития *Spirogyra* 5–7 лет назад, в Байкале не наблюдалось. Более того, колебания уровня воды происходили по всему озеру, но наши гидрохимические измерения с 2007 по 2014 гг. в интерстициальной, придонной и поверхностных водах (Timoshkin et al., 2012b; Tomberg et al., 2012) показали, что концентрации макроэлементов (=основных биогенов) сильно варьировали вдоль побережья, при этом значения концентраций биогенных элементов наиболее высокими были там, где деятельность человека на берегу была наибольшей (Khodzher et al., 2017; Tomberg et al., 2016).

Некоторые авторы предположили, что вспышка роста *Spirogyra* связана с необычно низким уровнем воды (примерно 455.9 м), отмеченном в 2015, что было вызвано низким выпадением осадков. Тем не менее, в 1980–1982 гг. уровень озера был на 0.6 м ниже, чем в 2015 (рис. 11), а отрицательного воздействия этого на прибрежные сообщества не наблюдалось. Наконец, недавние случаи массового развития спирогиры начались в 2010–2011 годах, когда уровень воды в озере был нормальным, а колебания низкими.

Уменьшение пресса со стороны беспозвоночных, питающихся водорослями

Как показали результаты мета-анализа 865 экспериментов (полевых и лабораторных), в которых изучался контроль биомассы перифитона⁷ со стороны беспозвоночных, питающихся водорослями, в проточных, стоячих и морских экосистемах, эти животные могут быть весьма эффективны для контроля биомассы бентосных водорослей.

⁷ Сообщество, включающее водоросли, обрастающие камни и другой субстрат.

Следовательно, ослабление нагрузки выедания [водорослей теоретически] может усиливать цветение бентосных водорослей. Большая часть озерных травоядных, однако, не способна употреблять в пищу крупные нитчатые водоросли (например, *Spirogyra*) (Cattaneo, 1987). Также нет очевидной причины для сокращения поедающих бентосные водоросли травоядных, либо нагрузки выедания, которая могла бы позволить спирогире интенсивно развиваться в тех местах озера Байкал, в которых сконцентрированы эпицентры этих вспышек роста. Сокращение нагрузки выедания, возможно, опосредованно могло бы быть связано с массовым развитием *Spirogyra*, если бы травоядные покинули зараженные спирогирой области дна из-за плохого качества пищи, или вследствие избегания нехватки кислорода, связанной с разложением водоросли. Однако, массовое развитие *Spirogyra* в районах вспышек роста требует достаточного поступления биогенных элементов, не взирая на давление со стороны травоядных. Таким образом, сокращение нагрузки выедания может быть вторичным результатом, усугубляющим проблему, но вряд ли является главной причиной.

В заключении [следует подчеркнуть, что проанализированные нами] данные об альтернативных причинах массового развития спирогир в Байкале не подтверждают гипотезу, согласно которой любая из них⁸ может являться основной причиной, ответственной за⁹ недавнюю вспышку роста *Spirogyra* в озере. Но эти данные также и не отрицают гипотезу, что увеличение температуры воды может синергетически воздействовать совместно с поступлением избыточных биогенных элементов и, вероятно, вторичной потерей травоядных, чтобы вызвать [столь] опасное изменение экосистемы. Что действительно вызывает беспокойство так это то, что массовое развитие *Spirogyra* теперь происходит в течение всего года по крайней мере в трех районах прибрежной зоны озера (залив Лиственничный, город Байкальск на юге и вблизи города Северобайкальска на севере, рис. 1), что заставляет нас предположить, что эти обильные разрастания водоросли стали постоянным состоянием [прибрежных фитоценозов]. Если продолжится поступление избыточных биогенных элементов в прибрежную зону этого олиготрофного озера, то может возникнуть стабильное измененное состояние прибрежной экосистемы, которое может сохраниться на долгий отрезок времени, сравнимый с периодом водообмена озера (377–400 лет). Единственным средством для остановки «канцерогенного» роста [чужеродных водорослей] из имеющихся в наличии на сегодняшний день является прекращение выбросов «канцерогенных» сточных вод и поступления [в озеро] излишних биогенов [=биогенных элементов].

Выводы и рекомендации

Примененный нами междисциплинарный подход, который включает многолетние сведения по: 1) пространственно-временной динамике *Spirogyra*; 2) химическим и микробиологическим анализам грунтовых вод, а также интерстициальных, придонных и поверхностных вод озера; 3) многолетней динамике температуры поверхностных и придонных вод; 4) колебаниям уровня воды, подтверждает гипотезу о том, что антропогенная эвтрофикация является главной движущей силой массового развития *Spirogyra* в озере Байкал. «*Spirogyra* морфотип 1», по-видимому, является чувствительным

⁸ [Т.е. – повышение температуры поверхности воды, колебания и/или снижение уровня воды в озере и уменьшение пресса со стороны травоядных]

⁹ [Либо – инициировавшей]

биологическим показателем сточных вод, поступающих в прибрежную зону вместе с грунтовыми водами из окружающих озеро Байкал поселков. Осенью, в период своего максимального развития, водоросль существенно влияет и изменяет состав естественных для Байкала зообентосных сообществ (Rozhkova et al., 2016). В местах, где *Spirogyra* массово размножается (например, вблизи города Северобайкальск на северной оконечности озера), гигантские массы гниющих водорослей накапливались ежегодно, по крайней мере, с 2013 года, вдоль побережий (Timoshkin et al., 2016; рис. S3). Эти массы, в свою очередь, являются причиной ухудшения качества вод и их вторичного загрязнения биогенными элементами и бактериями (Tomberg I.V. and Malnik V.V., устн. сообщ., Лимнологический институт СО РАН, 2017), а также причиной изменения сообществ прибрежного планктона (Sheveleva et al., 2017). Процесс бентосной эвтрофикации и загрязнения сточными водами прибрежной зоны озера Байкал должен быть немедленно остановлен. Ранее нами были подготовлены предварительные безотлагательные рекомендации (Timoshkin et al., 2014), которые мы повторяем и расширяем в данной статье. Во-первых, оценка текущего экологического состояния экосистемы озера Байкал, основанная исключительно на научных данных и доводах, должна быть представлена во всех подробностях правительству Российской Федерации. Необходимо найти общий язык для обеспечения передачи информации среди всех заинтересованных сторон, включая ученых, официальных представителей государственных служб, широкой общественности. Особенно мы рекомендуем: 1) сокращение [дополнительной] нагрузки биогенными элементами (азота и фосфора) на прибрежную зону озера, путем внедрения соответствующих систем очистки сточных вод в прибрежных поселениях и городах, включая модернизацию существующих систем очистки сточных вод с использованием новых технологий, которые позволяют доводить концентрации P и N в очищенных стоках до естественных концентраций, свойственных незагрязненным водам озера Байкал; 2) строгий контроль за деятельностью очистных сооружений и сбросом подсланевых вод с кораблей; 3) проведение информационной кампании по продвижению использования безфосфатных моющих средств постоянными жителями, туристами и хозяевами гостиниц в пределах центральной экологической зоны озера (объяснение термина см. Antipov et al., 2007); и 4) принятие запрета на производство фосфат-содержащих моющих средств на территории России, который был бы сходен с тем, который существует в Японии для озера Бива (Инициативы по всестороннему сохранению озера Бива, 2012) и для Великих Американских озер (Litke, 1999). Наконец, жизненно важно расширить существующую федеральную схему мониторинга для экосистемы озера Байкал, которая сейчас сосредоточена в основном на зоне пелагиали. В нее следует включить междисциплинарный мониторинг прибрежной зоны, включая зону заплеска, придонные воды и бентосные сообщества. Такая программа мониторинга, одобренная Всемирным Лимнологическим Конгрессом, г. Лахти, 2004, в сочетании со схемой мониторинга для заплесковой зоны озера Байкал (Timoshkin et al., 2012b, 2012c), имеется и может служить в качестве руководства к действию (Timoshkin et al., 2005, 2011, 2012a, 2012b, 2012c).

Дополнительные данные по этой статье можно найти на сайте <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.01.008>.

Участие авторов

Первый автор задумал и разработал это исследование, и предоставил фото для рис. 2, 4–6 и S1–S9. О.А. Тимошкин, Н.Н. Куликова, В.В. Мальник, В.М. Домышева, И.В. Томберг, А.Е. Побережная и Е.П. Зайцева собрали и обработали пробы. М. Ямамура предоставила фототехнику и лабораторное оборудование для подводных исследований и отредактировала рукопись. А.А. Широкая подготовила все рисунки и составила список литературы. О.А. Тимошкин написал статью с участием М.В. Мур, А.А. Широкой, Н.Н. Куликовой, В.В. Мальника, М.Н. Шимараева, Е.С. Троицкой, В.Н. Синюковича, М. Ямамура и Е.М. Тимошкиной (обзор литературы, статистический анализ и т.п.). Все авторы обсуждали результаты и дали окончательное одобрение для публикации. Всестороннее редактирование текста было выполнено носителем языка, М.В. Мур.

Благодарности

Эта работа выполнена в рамках федерального проекта № 0345-2016-0009 “Крупномасштабные изменения в экологии и биоразнообразии сообществ прибрежной зоны озера Байкал: междисциплинарные исследования, причины и перспективы” под руководством О.А. Тимошкина и Целевых Грантов научных исследований (КАКЕННИ) № 15Н05112 под руководством М. Ямамура и О.А. Тимошкина. Данные по температуре и уровню воды получены в рамках федерального проекта № 0345–2016–0008 «Изменение абиотических и биотических характеристик экосистемы озера Байкал под влиянием природных и антропогенных факторов» под руководством Т.В. Ходжер. Е. Якушина (Worley Parsons Ltd., Канада) любезно спонсировала несколько подводных отборов бентосных проб. Мы сердечно благодарим работников ЛИИ СО РАН: Е.Н. Водневу за анализ элементного состава образцов воды и экстрактов, выполненный в Центре Общего пользования «Ультраз-микроанализ» и В.Н. Александрова за изготовление основы для рис. 3 (рисунок тушью), Ю.М. Алексееву и А.Н. Гурулеву за предоставление литературы по запрещению фосфат-содержащих моющих средств. Мы выражаем благодарность анонимному рецензенту, помощнику редактора Дж. Макаревичу и главному редактору Р.Е. Хейки за комментарии, которые улучшили рукопись [данной статьи].

Список литературы

- Afanasyeva, E.L., Shimaraev, M.N., 2006. Long-term zooplankton variations in the pelagial of Lake Baikal under global warming. In: Alimov, A.F., Bul'on, V.V. (Eds.), *Aquatic Ecology at the Dawn of the XXI Century*. KMK Scientific Press Ltd., Moscow, pp. 253–265.
- Antipov, A.N., Gagarinova, O.V., Fedorov, V.N., 2007. Landscape hydrology: theory, methods and implementation. *Geogr. Nat. Resour.* 3, 56–67.
- Baram, G.I., Vereshchagin, A.L., Golobokova, L.P., 1999. Application of microcolumn HPLC with UV detection to analysis of anions in environmental objects. *Zh. Anal. Khim.* 54, 962–965.
- Barton, D.R., Howell, E.T., Fietsch, C., 2013. Ecosystem changes and nuisance benthic algae on the southeast shores of Lake Huron. *J. Great Lakes Res.* 39, 602–611.
- Berezov, T.T., Korovkin, B.F., 1998. *Biological Chemistry*. Medicina Publ., Moscow.
- Boeva, L.V. (Ed.), 2009. *Manual for Chemical Analysis of Surface Water. Part I. NOK*, Rostov-on-Don, pp. 1–1044.

- Cattaneo, A., 1987. Periphyton in lakes of different trophy. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44, 296–303.
- Chernova, M., 2017. “Violators have no chance”. Ol'khon district tourist camps, discharging their wastes into Lake Baikal, were closed by public procurator. <http://fedpress.ru/article/1890861>.
- Diaz, R.J., Rosenberg, R., 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321, 926–929.
- Federal Centre of Sanitary Inspection Ministry of Health of Russia, 2004. The Sanitary-microbiological and Sanitary-parasitological Analysis of Water from Surface Water Bodies: Instructional Guidelines 4.2.1884–04. Moscow. pp. 1–44.
- Federal Standard of Russian Federation: Water, 2015. Field methods of the sanitary and bacteriological analysis. Standartinform Press, Moscow, pp. 1–24.
- Frandsen, M., Nilsson, B., Engesgaard, P., Pedersen, O., 2012. Groundwater seepage stimulates the growth of aquatic macrophytes. *Freshw. Biol.* 57, 907–921.
- Galazyi, G.I., 1987. *Baikal in Questions and Answers*. East Siberian Book Publishers, Irkutsk.
- Grachev, M.A., 2002. On Recent State of Ecological System of Lake Baikal. Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.
- Hagerthey, S.E., Kerfoot, W.C., 1998. Groundwater flow influences the biomass and nutrient ratios of epibenthic algae in a north temperate seepage lake. *Limnol. Oceanogr.* 43, 1227–1242.
- Hagerthey, S.E., Kerfoot, W.C., 2005. Spatial variation in groundwater-related resource supply influences freshwater benthic algal assemblage composition. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 24, 807–819.
- Hainz, R., Wöber, C., Schagerl, M., 2009. The relationship between *Spirogyra* (Zygnematophyceae, Streptophyta) filament type groups and environmental conditions in Central Europe. *Aquat. Bot.* 91, 173–180.
- Hampton, S.E., Izmet'eva, L.R., Moore, M.V., Katz, S.L., Dennis, B., Silow, E.A., 2008. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake — Lake Baikal, Siberia. *Glob. Chang. Biol.* 14, 1947–1958.
- Izhboldina, L.A., 2007. Guide and Key to Benthic and Periphyton Algae of Lake Baikal (Meio- and Macrophytes) with Brief Notes on their Ecology. Nauka-Centre, Novosibirsk.
- Jarvis, P., Rey, A., Petsikos, C., Wingate, L., Rayment, M., Pereira, J., Banza, J., David, J., Miglietta, F., Borghetti, M., Manca, G., Valentini, R., 2007. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: the “Birch effect”. *Tree Physiol.* 27, 929–940.
- Karl, D.M., Tien, G., 1997. Temporal variability in dissolved phosphorus concentrations in the subtropical North Pacific Ocean. *Mar. Chem.* 56, 77–96.
- Katz, S.L., Hampton, S.E., Izmet'eva, L.R., Moore, M.V., 2011. Influence of long-distance climate teleconnection on seasonality of water temperature in the world's largest lake — Lake Baikal, Siberia. *PLoS ONE* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014688>.
- Kaurichev, I.S., Yashyn, I.M., Chernikov, V.A., 1996. Theory and Practice of the Method of Sorption Lysimeters in Ecological Studies. Publishing house of the Moscow Agricultural Academy, Moscow.
- Khodzher, T.V., Domysheva, V.M., Sorokovikova, L.M., Sakirko, M.V., Tomberg, I.V., 2017. Current chemical composition of Lake Baikal water. *Inland Waters* 7, 250–258.

- Kozhov, M.M., 1972. *Essays on Lake Baikal*. East Siberian Book Publisher, Irkutsk.
- Kozhova, O.M., Izmet'seva, L.R., 1998. *Lake Baikal: Evolution and Biodiversity*. Backhuys, Leiden.
- Kravtsova, L.S., Izhboldina, L.A., Khanaev, I.V., Pomazkina, G.V., Domysheva, V.M., Kravchenko, O.S., Grachev, M.A., 2012. Disturbances of the vertical zoning of green algae in the coastal part of the Listvennichnyi gulf of Lake Baikal. *Dokl. Akad. Nauk* 447, 227–229.
- Kravtsova, L.S., Izhboldina, L.A., Khanaev, I.V., Pomazkina, G.V., Rodionova, E.V., Domysheva, V.M., Sakirko, M.V., Tomberg, I.V., Kostornova, T.Ya., Kravchenko, O.S., Kupchinsky, A.B., 2014. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal. *J. Great Lakes Res.* 40, 441–448.
- Lake Biwa Comprehensive Preservation Initiatives, 2012. Lake Biwa comprehensive preservation liaison coordination council. <http://www.mlit.go.jp/common/001041797.pdf>.
- Lambert, D., Cattaneo, A., Carignan, R., 2008. Periphyton as an early indicator of perturbation in recreational lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 65, 258–265.
- Lewandowski, J., Meinikmann, K., Nützmann, G., Rosenberry, D.O., 2015. Groundwater — the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 2: effects of groundwater on nutrients. *Hydrol. Process.* 29, 2922–2955.
- Litke, D.W., 1999. Review of phosphorus control measures in the United States and their effects on water quality. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4007. National Water-Quality Assessment (NAWQA) Program (<https://pubs.usgs.gov/wri/wri994007/>).
- Lodge, D.M., Krabbenhoft, D.P., Striefl, R.G., 1989. A positive relationship between groundwater velocity and submersed macrophyte biomass in Sparkling Lake, Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.* 34, 235–239.
- MacFarquhar, N., 2017. A Russian Lake's future hangs on tourists and toilets. <https://www.nytimes.com/2017/03/13/world/europe/a-russian-lakes-future-hangs-ontourists-and-toilets.html>.
- Meinikmann, K., Hupfer, M., Lewandowski, J., 2015. Phosphorus in groundwater discharge — a potential source for lake eutrophication. *J. Hydrol.* 524, 214–226.
- Millenium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water*. World Resources Institute, Washington, D.C.
- Nakashizuka, T., Stork, N., 2002. Biodiversity Research Methods: IBOY in Western Pacific and Asia. Kyoto University Press and Trans Pacific Press, Japan–Australia:pp. 1–216 <http://xn—8sbwebcgqgbhxl1dvg.xn-p1ai/statisticheskije-pokazateli-ponaseleniyu-na-1-yanvary-2012g.html>.
- Périllon, C., Pöschke, F., Lewandowski, J., Hupfer, M., Hilt, S., 2018. Stimulation of epiphyton growth by lacustrine groundwater discharge to an oligo-mesotrophic hard-water lake. *Freshw. Sci.* 36 (in press).
- Rabalais, N.N., Turner, R.E., Wiseman, W.J., 2002. Gulf of Mexico hypoxia, a.k.a. “the dead zone.”. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 33, 235–263.
- Resolution of the Government of Russian Federation, 2001. March 26, 2001, no 234 “On the limitation of the water level of Lake Baikal during the economic and other activity”. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=43749>.

- Rosenberger, E.E., Hampton, S.E., Fradkin, S.C., Kennedy, B.P., 2008. Effects of shoreline development on the nearshore environment in large deep oligotrophic lakes. *Freshw. Biol.* 53, 1673–1691.
- Rosenberry, D.O., Lewandowski, J., Meinikmann, K., Nützmann, G., 2015. Groundwater — the disregarded component in nutrient budgets. Part 1: effects of groundwater on hydrology. *Hydrol. Process.* 29, 2895–2921.
- Rozhkova, N.A., Timoshkin, O.A., Nepokrytykh, A.V., Maximova, N.V., Bondarenko, N.A., 2016. Abrupt changes in the macrozoobenthos communities of stony littoral in Lake Baikal under mass development of *Spirogyra* green filamentous algae. Abstract Book of the 3rd Int. Symposium of Benthological Society of Asia. Dalnauka, Vladivostok, p. 103.
- Schneider, S.C., Lindstrom, E., 2011. The periphyton index of trophic status PIT; a new eutrophication metric based on non-diatomaceous benthic algae in Nordic rivers. *Hydrobiologia* 665, 143–155.
- Schneider, S.C., Cara, M., Eriksen, T.E., Goreska, B.B., Imeri, A., Kupe, L., Lokoska, T., Patceva, S., Trajanovska, S., Trajanovski, S., Talevska, M., Sarafiloska, E.V., 2014. Eutrophication impacts littoral biota in Lake Ohrid while water phosphorus concentrations are low. *Limnologia* 44, 90–97.
- Sebestyen, S.D., Schneider, R.L., 2004. Seepage patterns, pore water, and aquatic plants: hydrological and biogeochemical relationships in lakes. *Biogeochemistry* 68, 383–409.
- Sheveleva, N.G., Timoshkin, O.A., Misharina, E.A., 2017. Dynamics of zooplankton communities in shallow parts of northern Baikal during blooms of green filamentous algae *Spirogyra* spp. (Chlorophyta, Zygnematophyceae) in 2013–2014. *Bull. MOIP* 122, 35–44.
- Shimaraev, M.N., Domysheva, V.M., 2013. Trends in hydrological and hydrochemical processes in Lake Baikal under conditions of modern climate change. In: Goldman, C.R., et al. (Eds.), *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, pp. 43–66.
- Shimaraev, M.N., Verbolov, V.I., Granin, N.G., Sherstyankin, P.P., 1994. *Physical Limnology of Lake Baikal: A Review 2*. Okayama University Press, Irkutsk–Okayama, p. 81.
- Shimaraev, M.N., Kuimova, L.N., Sinyukovich, V.N., Tsekhanovskii, V.V., 2002. Manifestation of global climatic changes in Lake Baikal during the 20th century. *Dokl. Earth Sci.* 383A, 288–291.
- Sizova, L.N., Kuimova, L.N., Shimaraev, M.N., 2013. Air circulation influence on ice-thermal processes in Baikal in 1950–2010. *Geogr. Nat. Resour.* 2, 74–83.
- Smith, R.F., Ludwig, H.F., 1968. Eutrophication mechanisms at Lake Tahoe — I. Source of an exogenous *Spirogyra* bloom on the south shore, January 1967. *Water Res.* 2, 615–624.
- Smith, V.H., Schindler, D.W., 2009. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol. Evol.* 24, 201–207.
- Suturin, A.N., Paradina, L.F., Epov, V.N., Semenov, A.R., Lozhkin, V.I., Petrov, L.L., 2003. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water. *Spectrochim. Acta* 58, 277–288.
- Suturin, A.N., Kulikova, N.N., Boyko, S.M., Saybatalova, E.V., 2013. Extraction of chemical elements from rocks by Baikal water and organic substances. *Geochemistry* 5, 471–480.
- Timoshkin, O.A., 2011. Main tendencies in research of ancient lake biodiversity; most interesting recent discoveries in biodiversity of Lake Baikal. In: Timoshkin, O.A., et al.

(Eds.), Index of Animal Species Inhabiting Lake Baikal and its Catchment Area 2. Nauka, Novosibirsk, pp. 1423–1428.

- Timoshkin, O.A., Coulter, G., Wada, E., Suturin, A.N., Yuma, M., Bondarenko, N.A., Melnik, N.G., Kravtsova, L.S., Obolkina, L.A., Karabanov, E.B., 2005. Is the concept of a universal monitoring system realistic? Landscape-ecological investigations on Lake Baikal (East Siberia) as a possible model. *Internat. Verein. Limnol.* 29, 315–320.
- Timoshkin, O.A., Suturin, A.N., Bondarenko, N.A., Kulikova, N.N., Rozhkova, N.A., Sheveleva, N.G., Obolkina, L.A., Domysheva, V.M., Zaytseva, E.P., Malnik, V.V., Maximova, N.V., Nepokrytykh, A.V., Shirokaya, A.A., Lukhnev, A.G., Popova, O.V., Potapskaya, N.V., Vishnyakov, V.S., Volkova, E.A., Zvereva, Yu.M., Logacheva, N.F., Sakirko, M.V., Tomberg, I.V., Kostornova, T.Ya., 2011. Biology of the coastal zone of Lake Baikal. 1. Overview of the current knowledge on the splash zone, first results of interdisciplinary investigations, monitoring as a basic tool in ecological research. *Bull. Irk. State Univ.* 4, 75–110.
- Timoshkin, O.A., Vishnyakov, V.S., Volkova, E.A., Shirokaya, A.A., Kulikova, N.N., Zaytseva, E.P., Lukhnev, A.G., Popova, O.V., Tomberg, I.V., Potapskaya, N.V., Zvereva, Yu.M., Malnik, V.V., Bondarenko, N.A., Rozhkova, N.A., Obolkina, L.A., Sheveleva, N.G., Kostornova, T.Ya., Suturin, A.N., Nepokrytykh, A.V., Logacheva, N.F., 2012a. Biology of the coastal zone of Lake Baikal. 2. Accumulated material on the lake shore (splash zone): classification, seasonal dynamics. *Bull. Irk. State Univ.* 5, 40–91.
- Timoshkin, O.A., Tomberg, I.V., Kulikova, N.N., Popova, O.V., Malnik, V.V., Kostornova, T. Ya., Lukhnev, A.G., Zaytseva, E.P., Shirokaya, A.A., Potapskaya, N.V., Zvereva, Yu.M., Bondarenko, N.A., Rozhkova, N.A., Obolkina, L.A., Sheveleva, N.G., Suturin, A.N., Saybatalova, Ye.V., Nepokrytykh, A.V., Vishnyakov, V.S., Volkova, E.A., Logacheva, N. F., 2012b. Biology of the coastal zone of Lake Baikal. 3. Seasonal dynamics of the infauna of the onshore accumulated material, hydrochemical and microbiological analyses of interstitial water in the splash zone. *Bull. Irk. State Univ.* 5, 92–110.
- Timoshkin, O.A., Suturin, A.N., Bondarenko, N.A., Kulikova, N.N., Rozhkova, N.A., Sheveleva, N.G., Obolkina, L.A., Domysheva, V.M., Zaytseva, E.P., Malnik, V.V., Maximova, N.V., Tomberg, I.V., Nepokrytykh, A.V., Shirokaya, A.A., Lukhnev, A.G., Popova, O.V., Potapskaya, N.V., Vishnyakov, V.S., Volkova, E.A., Zvereva, Yu.M., Logacheva, N.F., Sakirko, M.V., Kostornova, T.Ya., 2012c. Introduction into biology of the coastal zone of Lake Baikal. 1. Splash zone: first results of interdisciplinary investigations and its role for the lake ecosystem monitoring. *Bull. Irk. State Univ.* 5, 33–46.
- Timoshkin, O.A., Malnik, V.V., Sakirko, M.V., Boedeker, K., 2014. Environmental crisis at Lake Baikal: scientists diagnose. *Sci. First Hand* 5, 75–91.
- Timoshkin, O.A., Bondarenko, N.A., Volkova, E.A., Tomberg, I.V., Vishnyakov, V.S., Malnik, V.V., 2015. Mass development of green filamentous algae of the genera *Spirogyra* and *Stigeoclonium* (Chlorophyta) in the littoral zone of the southern part of Lake Baikal. *Hydrobiol. J.* 51, 13–23.
- Timoshkin, O.A., Samsonov, D.P., Yamamuro, M., Moore, M.V., Belykh, O.I., Malnik, V.V., Sakirko, M.V., Shirokaya, A.A., Bondarenko, N.A., Domysheva, V.M., Fedorova, G.A., Kochetkov, A.I., Kuzmin, A.V., Lukhnev, A.G., Medvezhonkova, O.V., Nepokrytykh, A. V., Pasyunkova, E.M., Poberezhnaya, A.E., Potapskaya, N.V., Rozhkova, N.A., Sheveleva, N.G., Tikhonova, I.V., Timoshkina, E.M., Tomberg, I.V., Volkova, E.A., Zaitseva, E.P., Zvereva, Yu.M., Kupchinsky, A.B., Bukshuk, N.A., 2016. 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.* 42, 487–497.
- Tokareva, V., 2016. The Baikal reservation. How Buryatia citizens were restricted in the rights in their struggle for environmental improvements. <https://lenta.ru/articles/2016/03/23/baikal/>.
- Tomberg, I.V., Sakirko, M.V., Domyшева, V.M., Sez'ko, N.P., Lopatina, I.P., Bashenkhaeva, N. V., Filevich, E.A., Kulikova, N.N., Popova, O.V., Malnik, V.V., Lukhnev, A.G., Zaytseva, E. P., Potapskaya, N.V., Zvereva, Yu.M., Timoshkin, O.A., 2012. First data on the chemical composition of interstitial waters in the splash zone of Lake Baikal. *Bull. Irk. State Univ.* 5, 64–74.
- Tomberg, I.V., Sakirko, M.V., Onishchuk, N.A., Timoshkin, O.A., 2016. Anthropogenic eutrophication of the littoral zone of Lake Baikal. Abstract Book of the 5th Int. Conference “Lake Ecosystems: Biological Processes, Anthropogenic Transformation, Water Quality”. Publ. house of the Belarusian State University, Minsk–Narach, pp. 110–111.
- Tomberg, I.V., Sakirko, M.V., Molozhnikova, E.V., Timoshkin, O.A., 2017. Ecological Characteristics of the Splash Zone of Lake Baikal (According to Chemical Components). Abstract Book of the all-Russian Scientific Conference “Fundamental Problems of the Ecology of Russia”. Publ. house of the V.B. Sochava Institute of Geography, SB RAS, Irkutsk, p. 193.
- Troitskaya, E.S., Shimaraev, M.N., Tsekhanovskiy, V.V., 2003. Many year changes of surface water temperature in Baikal. *Geogr. Nat. Resour.* 2, 47–50.
- Van Dover, C.L., Grassle, J.F., Fry, B., Garritt, R.H., Starczak, V.R., 1992. Stable isotope evidence for entry of sewage-derived organic material into a deep-sea food web. *Nature* 360, 153–156.
- Zbarsky, B.I., Ivanov, I.I., Mardashev, S.R., 1965. *Biological Chemistry*. Medicina Publ., Moscow.
- Zohary, T., Ostrovsky, I., 2011. Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes. *Inland Waters* 1, 47–59.

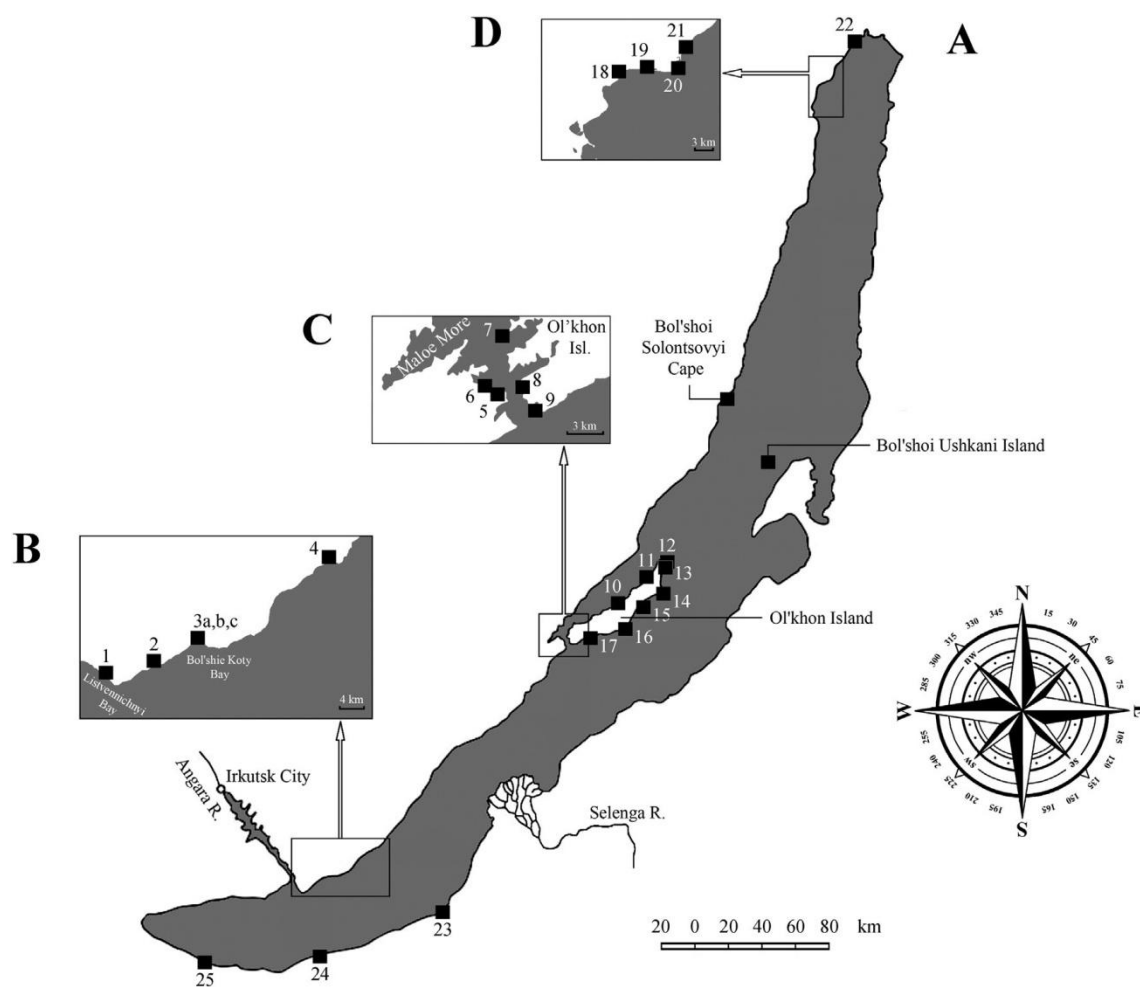


Рис. 1. Карта озера Байкал с местами отбора проб: 1 — поселок Листвянка, 2 — бухта Емельяниха, 3 — поселок и залив Большие Коты (а, Черная речка; b, ручей Жилище; с, речка Большая Котинка), 4 — село Большое Голоустное, 5 — Тутайский залив, 6 — поселок Сахаюрта, 7 — мыс Харин-Ирги, 8 — бухта Перевозная, 9 — залив Ушун, 10 — поселок Хужир и бухта Шаманка, 11 — мыс Зантык, 12 — мыс Хобой, 13 — мыс Шунтэ левый, 14 — мыс Ижимей, 15 — мыс Хара-Хушун, 16 — мыс Ухан, 17 — мыс Халзын, 18 — бухта Сеногда, 19 — село Заречное, 20 — исток реки Тья, 21 — город Северобайкальск, 22 — город Нижнеангарск, 23 — город Бабушкин, 24 — поселок Танхой, 25 — город Байкальск. Полевой стационар Лимнологического института (ЛПС) расположен в пределах поселка Большие Коты и одноименного залива, между 3b и 3с на карте-вставке В.

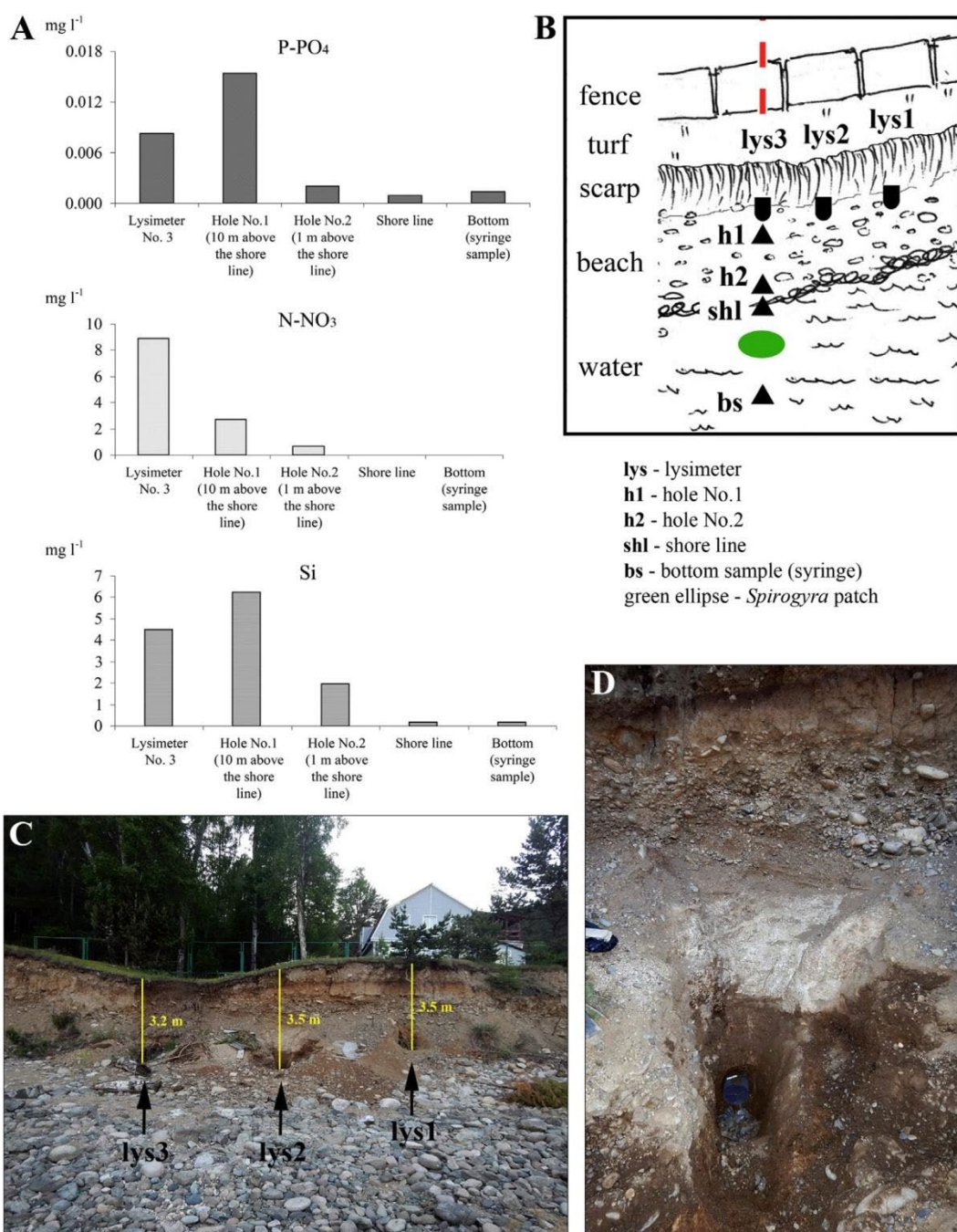


Рис. 2. Концентрации биогенных элементов (A), диаграмма (B) и фотографии (C, D) показывают расположение лизиметров [lys1–lys3] и дополнительных точек отбора проб для анализа грунтовых и прибрежных озерных вод перед стационаром ЛИН, Большие Коты, лето 2016. А — концентрации $\text{P}(\text{PO}_4^{3-})$, $\text{N}(\text{NO}_3^-)$ и Si (mg l^{-1}) в единичных образцах воды, собранных вдоль трансекты от лизиметра № 3 до береговой линии и мелководной зоны, август 2016. По оси X, слева направо: лизиметр; поровая вода из лунок №№ 1 и 2 (“h1” и “h2” на рис. 2 B); озерная вода с береговой линии (“shl” на рис. 2 B); интерстициальная поровая вода, собранная со дна озера в 10–15 м от береговой линии, где глубина воды была 1 м (“bs” на рис. 2 B; [при отборе проб] шприц погружался на 3–5 см вглубь субстрата на дне озера). С — расположение трех лизиметров, каждый в отдельной ямке (непосредственно над черной стрелкой) и помещенный у основания почвенного профиля (вертикальная желтая линия), вдоль берегового уступа перед стационаром ЛИН. Четвертый почвенный профиль и лизиметр находятся вне зоны видимости слева от лизиметра № 3. D — вид установленного лизиметра с близкого расстояния. Дополнительную информацию о сборе проб можно найти в разделе Методы. (За

разъяснением по цветовому решению в подписях к рисункам читатель может обратиться к электронной версии этой статьи на сайте)

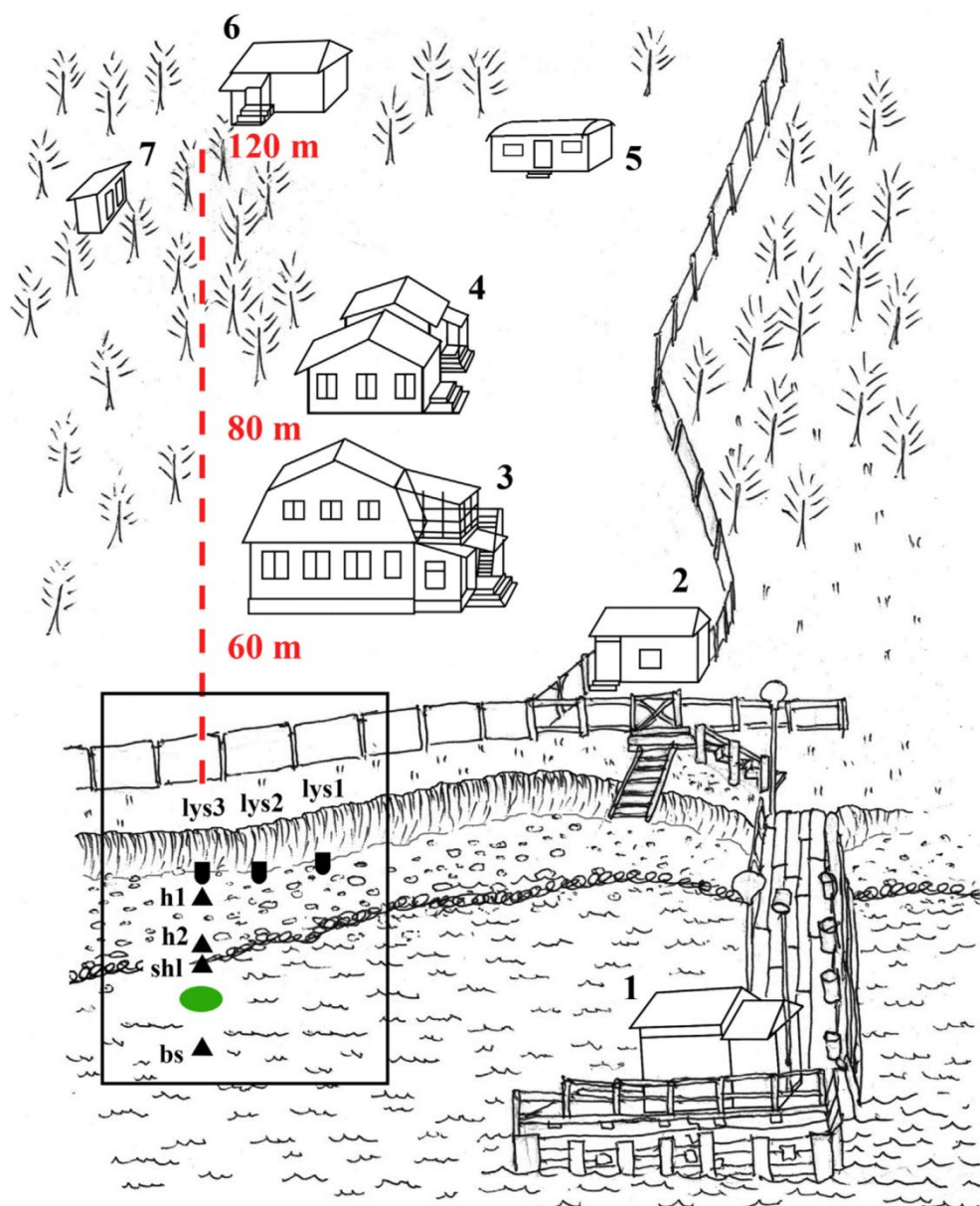


Рис. 3. Диаграмма полевого стационара Лимнологического Института (ЛПС), расположенного в 60–120 м от пляжа: 1 — гидрометеорологическая лаборатория, 2–3, 5 — жилые дома, 4 — кухня, 6 — сауна и помещения для стирки, 7 — туалет. Предполагаемый маршрут стока грунтовых вод (красная пунктирная линия) и местонахождение «пятна *Spirogyra* ЛПС» (зеленый овал). См. подписи к рис. 2 для расшифровки сокращений. (Объяснение цветовой гаммы в подписях к рисункам можно найти на сайте в электронной версии статьи).

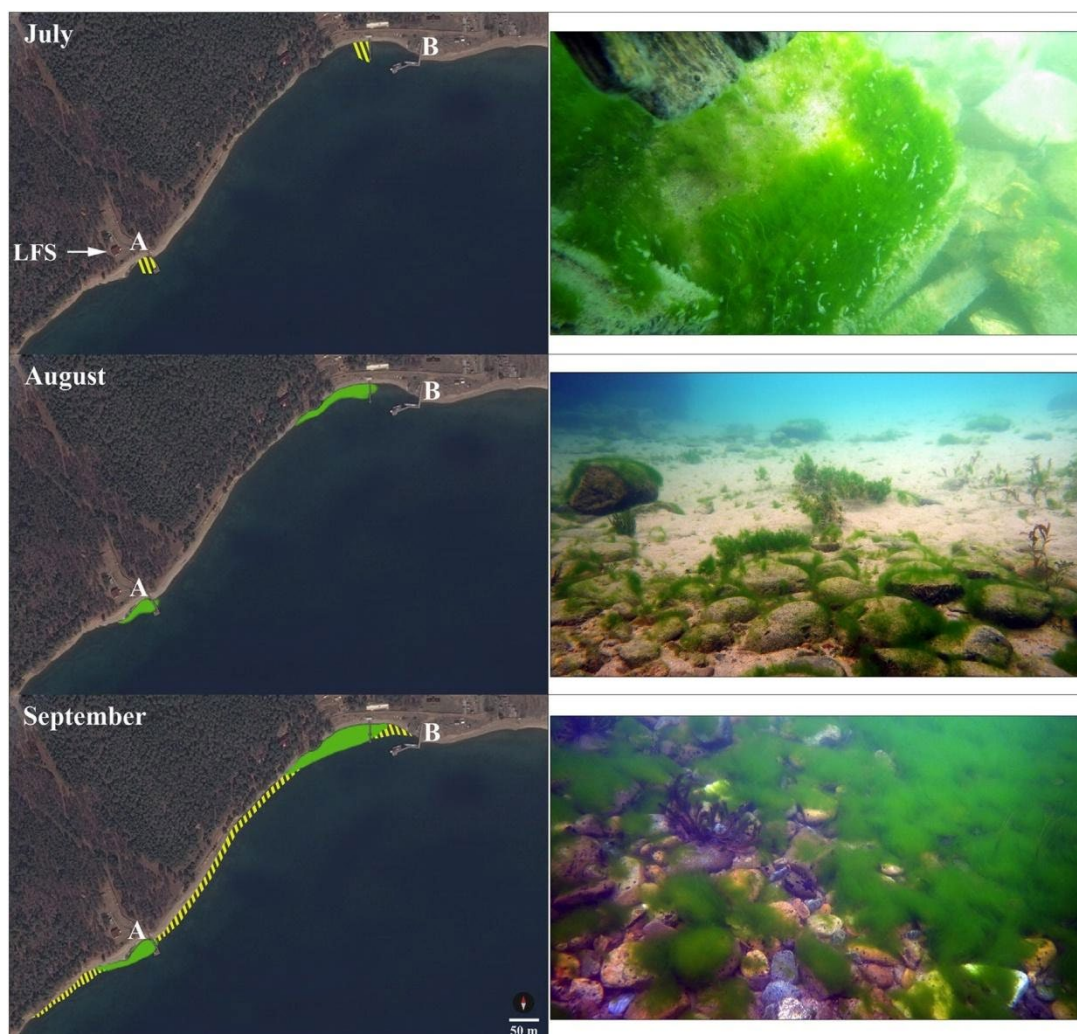


Рис. 4. Пространственное и временное распределение *Spirogyra* «морфотип 1» в прибрежной зоне залива Большие Коты, в июле-августе 2014–2016 гг. (вид сверху, левые фото), и подводные фото массового роста водорослей на деревянном пирсе А (вверху справа) и на дне озера, глубина 1.5 м, вблизи пирса В (две нижние фотографии справа). Зеленые области на аэро-снимках обозначают 80–100% площади проективного покрытия дна *Spirogyra* (сырая биомасса 300–500 г м⁻²), а желто-черные заштрихованные области обозначают места с сырой биомассой ≥ 100 –200 г м⁻² (при примерно 40–60% площади проективного покрытия). ЛПС — полевой стационар Лимнологического института СО РАН. Дополнительную информацию можно найти в тексте. (Разъяснение по цветовой гамме в подписях к рисункам читатель может найти на сайте в электронной версии статьи).



Рис. 5. Распределение и сырая биомасса *Spirogyra* на глубине 1 м (за исключением станции *Сахаюрта, где глубина воды была 0.5 м) вдоль побережья острова Ольхон, 2014–2016 гг. Цифры обозначают обилие бентосной *Spirogyra* (г м^{-2} сырой биомассы). Красными кружками отмечены места, где *Spirogyra* была обильна ($>100 \text{ г м}^{-2}$ сырой биомассы); синими кружками отмечены места, где *Spirogyra* никогда не была встречена в пробах; зеленые кружки отмечают места, где присутствие *Spirogyra* в пробах было незначительным (несколько отдельных нитей). Желтыми стрелками отмечены основные направления локальных течений воды (по: Kozhov, 1972), которые помогут объяснить распределение *Spirogyra* вдоль побережья острова Ольхон. (Объяснения цветов в подписи к рисунку читатель может найти на сайте в электронной версии этой статьи).

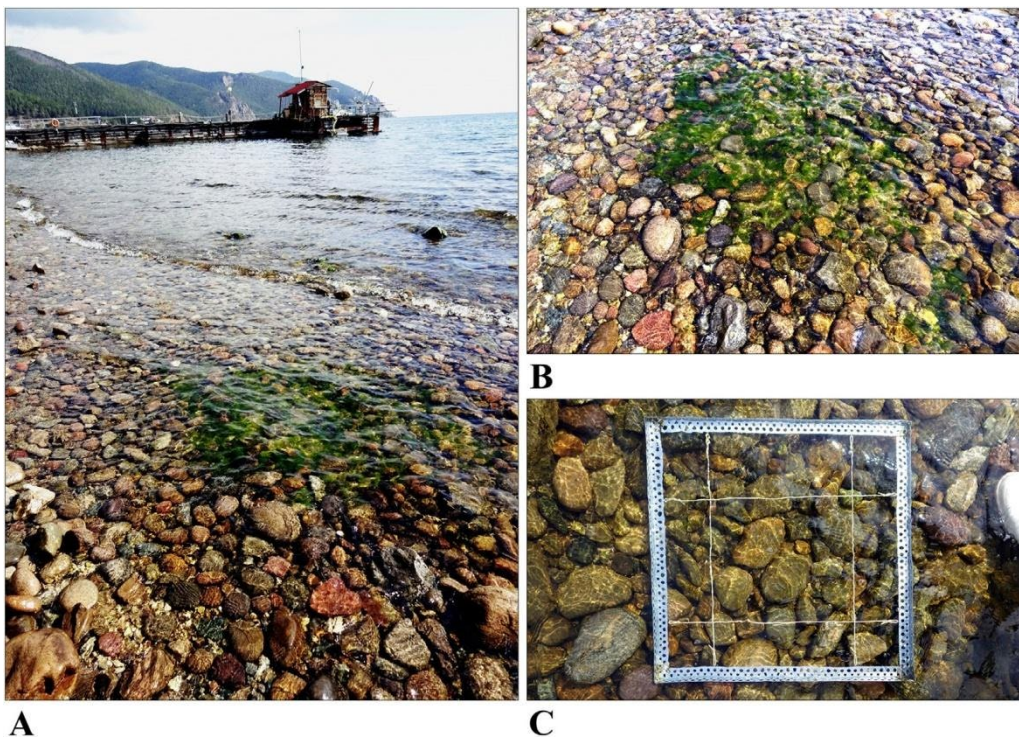


Рис. 6. Пятно *Spirogyra* «морфотип 1» (примерно 2 м в диаметре), перед ЛПС, залив Большие Коты («пятно ЛПС»), внешний вид, сентябрь 20, 2015. А, В — общий вид пятна (сырая биомасса *Spirogyra* $> 500 \text{ г м}^{-2}$). С — типичный вид озерного субстрата за пределами пятна. *Spirogyra* отсутствовала [в пробах, взятых] по крайней мере в 1 м в любом направлении от внешней границы пятна. Размер рамки: $50 \times 50 \text{ см}$.

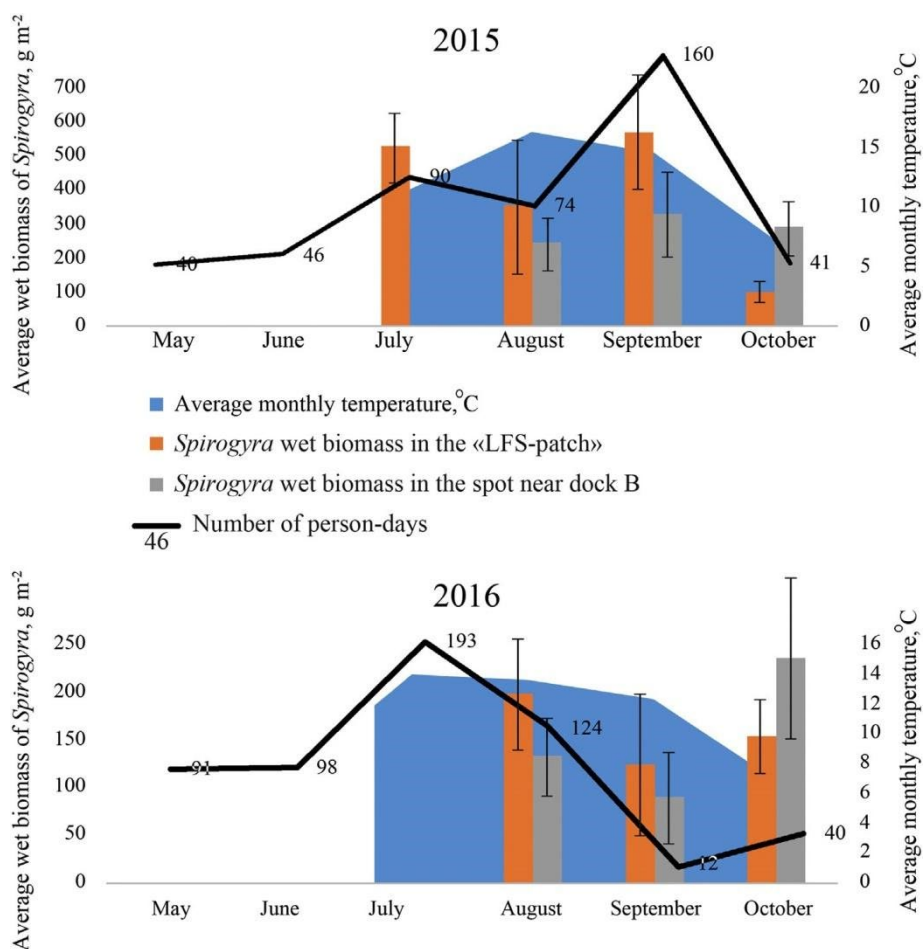
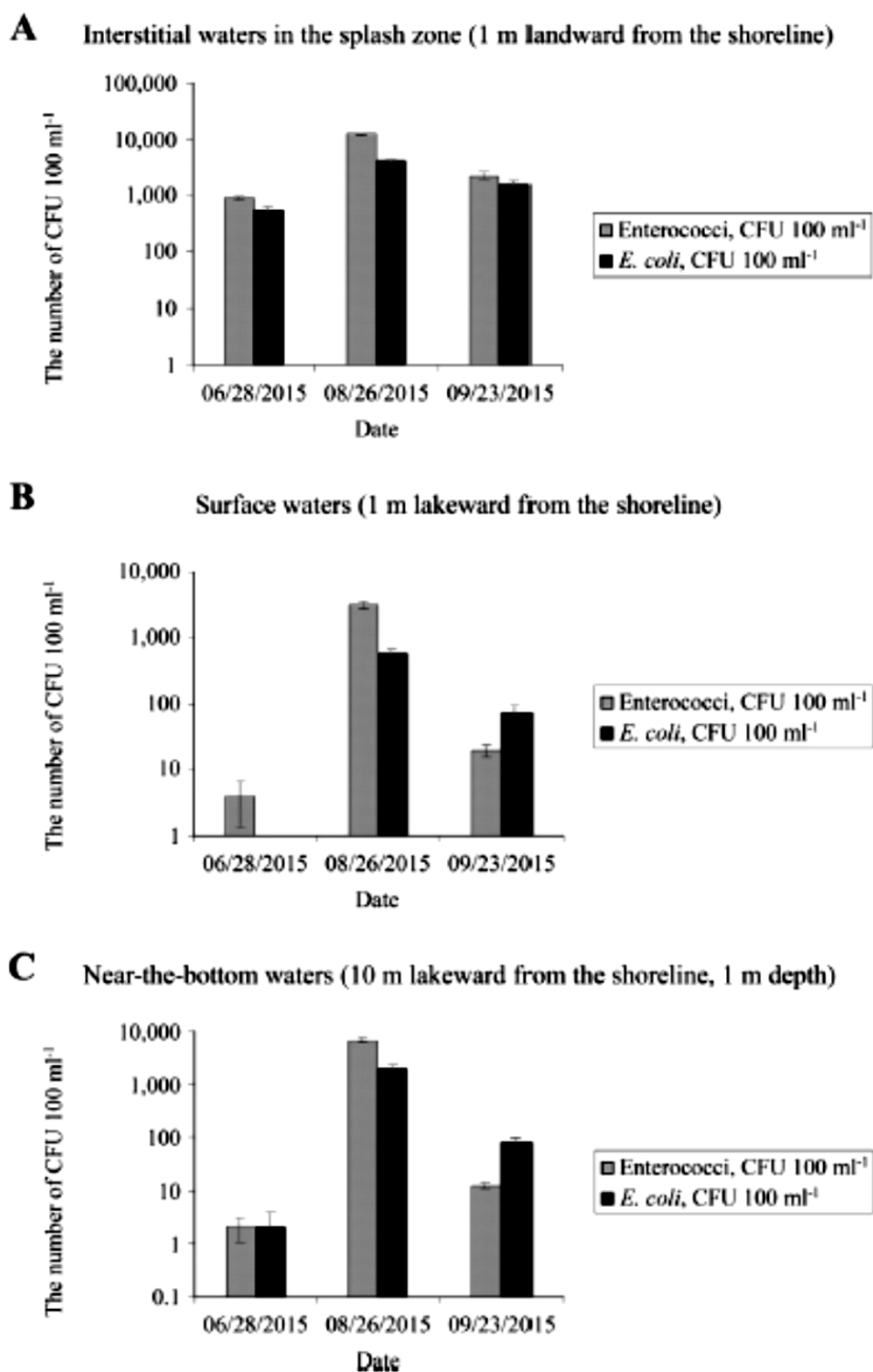


Рис. 7. Средняя сырая биомасса ($n = 3, \pm SD$) *Spirogyra* «морфотип 1», май–октябрь 2015–2016 гг. в «пятне *Spirogyra* ЛПС» (рис. 6), и сырая биомасса *Spirogyra* вблизи пирса В на рис. 4. Среднемесячные температуры воды рассчитаны по записям, регистрируемым каждые 30 мин в точке, расположенной в 15 м к северу от «пятна *Spirogyra* ЛПС», но на глубине воды (0.2–0.3 м), эквивалентной глубине расположения этого пятна. Число человеко-дней на ЛПС рассчитано, суммируя число дней, которое каждый человек присутствовал на стационаре в данный месяц. [Естественное осеннее] понижение уровня озера в октябре 2015 г. привело к тому, что «пятно *Spirogyra* ЛПС» оказалось выше уреза (рис. S9), что вызвало существенное сокращение сырой биомассы по сравнению с сентябрем 2015 г.

Рис. 8. Среднее обилие ($n=3$; \pm -SD) колониеобразующих единиц (КОЕ) каждой из двух групп бактерий – индикаторов фекального загрязнения (*Enterococci*, *E. coli*) в интерстициальной (А), поверхностной (В), и придонной (С) воде перед зданием ЛПС в июне-сентябре 2015 г. Средние значения для интерстициальных вод подсчитано для одновременного отбора проб из трех разных лунок (глубиной 0.3 м, вырытых в заплесковой зоне в 1 м друг от друга), расположенных в 1 м выше уреза воды.



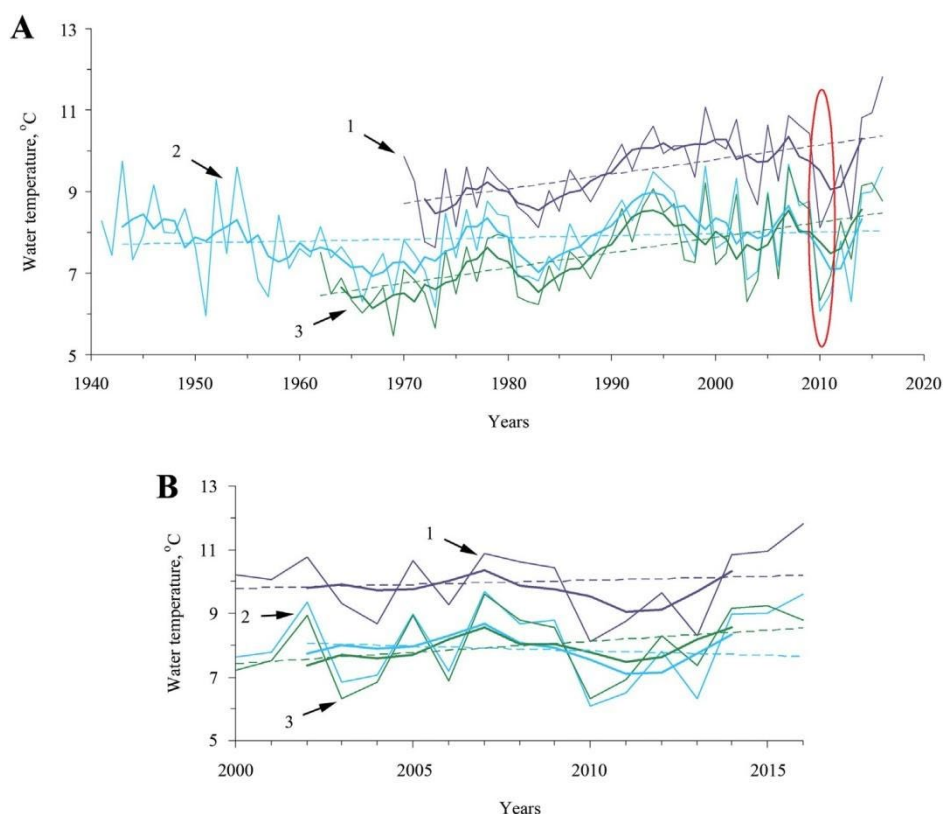


Рис. 9. Средние температуры поверхностной воды в мае-сентябре (тонкие линии), их тренды (пунктирные линии) и 5-летние сглаженные значения (толстые линии) для станций в литоральной зоне (0–3 м от береговой линии) на западном побережье Южного Байкала: поселок Большое Голоустное (1), поселок Листвянка (2) и ГМС устье реки Ангары (3) с начала измерений до 2016 г. (А) и с 2000 по 2016 гг. (В). Красным эллипсом отмечен год, в который начался кризис в прибрежной зоне. (Подробности по цветам в подписях к этому рисунку можно найти в электронной версии этой статьи на сайте).

Рис. 8. Среднее обилие ($n=3$; \pm -SD) колониеобразующих единиц (КОЕ) каждой из двух групп бактерий – индикаторов фекального загрязнения (*Enterococci*, *E. coli*) в поверхностной, придонной и интерстициальной воде перед зданием ЛПС в июне-сентябре 2015 г. Средние значения для интерстициальных вод подсчитано для единовременного отбора проб из трех разных лунок (глубиной 0.3 м, вырытых в заплесковой зоне в 1 м друг от друга), расположенных в 1 м выше уреза воды.

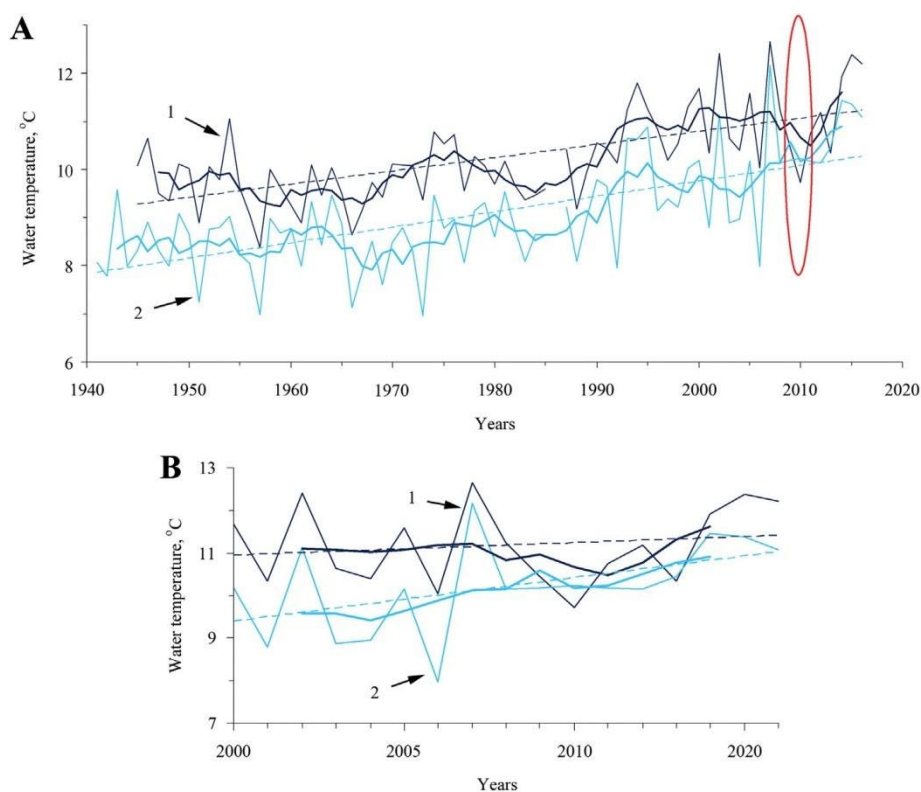


Рис. 10. Средние температуры поверхности воды в мае-сентябре (тонкие линии), их тренды (пунктирные линии) и 5-летние сглаженные значения (толстые линии) на станциях литоральной зоны (0–3 м от береговой линии) на восточном побережье южного Байкала: пгт Бабушкин (1) и поселок Танхой (2) с начала измерений до 2016 г. (А) и с 2000 до 2016 гг. (В). Красным эллипсом отмечен год начала кризиса в прибрежной зоне. (Объяснения по цветам в подписи к этому рисунку читатель может найти в электронной версии данной статьи.)

Электронное приложение к статье (ESM)

Загрязнение подземных вод сточными водами вызывает всплеск роста бентосных водорослей в литоральной зоне озера Байкал (Восточная Сибирь)

О.А.Тимошкин^{a,*}, М.В. Мур^b, Н.Н. Куликова^a, И.В. Томберг^a, В.В. Мальник^a, М.Н. Шимараев^a, Е.С. Троицкая^a, А.А. Широкая^a, В.Н. Синюкович^a, Е.П. Зайцева^a, В.М. Домышева^a, М. Ямамура^c, А.Е. Побережная^a, Е.М. Тимошкина^a

^a Лимнологический Институт Сибирское отделение
Российской Академии наук, ул. Улан-Баторская, 3, 664033
Иркутск, Россия

^b Факультет биологических наук, Колледж Веллеслей,
Веллеслей, МА 02481 США

^c Школа Пограничных наук, Отделение окружающей среды
Университет Токио, строение 562, 5-1-5 Кашиванога,
Кашива 277-8563, Япония

*Адрес для переписки: timole.turgenevo@gmail.com

Общие замечания по биологии и разнообразию *Spirogyra* в озере Байкал и на планете

До текущего экологического кризиса было описано пять видов рода *Spirogyra* в заливах и мелководья озера Байкал (см. Ижболдина, 2007). Они ограничивались редкими находками единичных вегетирующих нитей в образцах, собранных в открытых частях прибрежной зоны в течение 45 лет исследований Л.А. Ижболдиной макрофитобентоса. «Очевидно, представители рода *Spirogyra* растут только в изолированных, хорошо прогреваемых мелководных заливах и бухтах озера» (Ижболдина, 2007: стр. 213). Если суммировать все предыдущие данные, полученные за 80-летний период, предшествующий современному экологическому кризису, то можно утверждать, что *Spirogyra* никогда не образовывала массовых скоплений и\или береговых выбросов в открытых частях прибрежной зоны.

Согласно разным источникам, род *Spirogyra* распространен по всему миру и включает около 400–500 видов (Guiry and Guiry, 2015; Рундина, 1998). Определение спирогир до вида весьма сложно и основано на морфологии вегетирующих, зрелых нитей, типах конъюгации и зигоспор. Редко удастся обнаружить конъюгацию и зигоспоры в естественной среде. Поэтому ученые выделяют отдельные морфотипы, основываясь на

морфологии вегетирующих нитей (Hainz et al., 2009). В этой работе используется данный подход, и мы сосредоточились на двух наиболее широко распространенных в озере Байкал морфотипах, которые вместе преобладают по биомассе в осенних вспышках роста водоросли в пределах самого озера и некоторых его притоках (примерно $\geq 90\%$) (Timoshkin, 2016). Ранее были описаны прикрепленные (“морфотип 1”) и свободно-плавающие (“морфотип 2”) морфотипы из открытых мелководий озера Байкал (Timoshkin, 2016). «Морфотип 1» обычно появляется на твердых субстратах и доминирует (зачастую $> 95\%$ и почти 100% площади проективного покрытия) на каменистом дне вблизи прибрежных поселений, городов и областей с высокой рекреационной активностью (см. ниже) (рис. S1). Эти нити прикрепляются к каменистому дну и скалам при помощи ризоидов (рис. S1 A), при этом диаметр нити составляют 40–50 мкм, они имеют простую межклеточную стенку и три-четыре хлоропласта, хорошо различимых в молодых клетках в начале их роста (рис. S1 A–D). Хлоропласты «старых» клеток (в основном осенью) в пределах нити становятся сплошными, так называемыми «конденсированными» (рис. S1 E–F). В действительности, количество хлоропластов на этой стадии можно увидеть только в некоторых клетках; эти клетки расположены либо в базальной, либо апикальной части нити. В конце лета – осенью 2014–2016 гг. “морфотип 1” преобладал на глубине 0.5–1.5 м каменистого субстрата заливов Лиственничный, Большие Коты и бухт Ая, Перевозная, Харин-Ирги, Сеногда, Фролиха, Ая, вблизи поселений Байкальск, Слюдянка, Култук, Хужир, Северобайкальск, Заречное (рис. 1). «Морфотип 2» (свободно-плавающие водоросли) доминировал в некоторых притоках и на песчаных субстратах прибрежной зоны озера (реки Черная, Жилище, Большая Котинка; в бухте Сеногда и в окрестностях г. Северобайкальска). Диаметр нитей составлял 25–40 мкм, клетки обычно имели один или, гораздо реже, два хлоропласта (иногда в пределах одной и той же нити) (рис. S2 D–E, S3 B–C, S4). В исключительных случаях некоторые нити «морфотипа 2» могут также иметь ризоиды. Многочисленные дополнительные морфотипы появляются в прибрежной зоне открытой части озера, но, как правило, они редки, составляя незначительную часть проб (обычно $<10\%$ встречаемости)¹⁰. Некоторые из них показаны на светооптических фотографиях (рис. S1 B, E, S4 B, C). Водоросли «морфотипа 2» преобладали в теплых мелких и временных лужах вблизи бухты Сеногда и села Заречное в июне 2016 г. (рис. S3 A–C, S4), в то время как гигантское количество гниющей *Spirogyra*, покрытой песком из-за штормов и высокого уровня воды осенью 2015 г., в основном состояло из нитей «морфотипа 1» (рис. S3 D). В начале лета в местах круглогодичного загрязнения

¹⁰ Исследование таксономии байкальской *Spirogyra*, основанное на сравнительно-морфологическом и молекулярно-биологическом методах, выполняется в настоящее время (Волкова и др., 2013, 2015).

сточными водами нитчатые водоросли (с преобладанием *Spirogyra*) создают шароподобные скопления диаметром 3–7 мм, сосредотачивающиеся на песчаном дне озера (рис. S4 A).

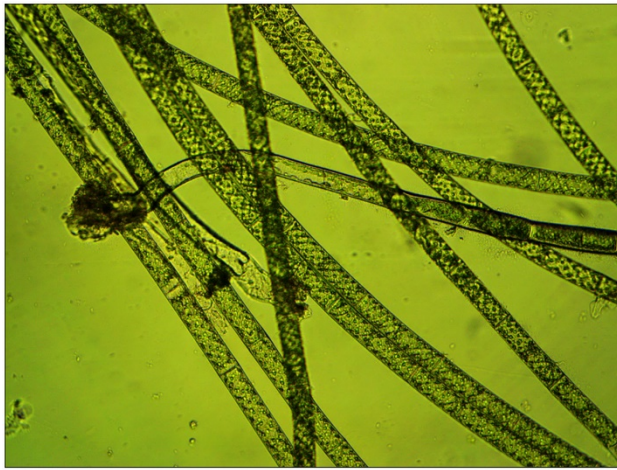
Дополнительные температурные данные подтверждают точку зрения о том, что *Spirogyra* выдерживает значительные колебания температуры.

На рисунке S10 представлены типичные суточные колебания температуры вблизи дна на глубине 3 м вдоль западного побережья южной котловины в летнее время. Измерения выполнены датчиками TidBit Stow Away Loggers. В августе-сентябре 2015 г., когда популяции *Spirogyra* находились уже на пике роста, температура колебалась в пределах 8–17.3°C в течение 24 часов (т.е. суточный градиент составлял почти 10°C). Многочисленные аналогичные примеры существенных дневных изменений температуры поверхностной и придонной воды в период открытой воды можно найти в электронной базе данных (Тимошкин и др., 2017). Это значит, что популяции *Spirogyra* и других бентосных обитателей прибрежной зоны озера Байкал (глубины 0.5–10 м) испытывают большие каждодневные суточные изменения температуры.

Список литературы для Электронного Приложения

- Guiry, M.D., Guiry, G.M., 2015. *Algae Base*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: <http://www.algaebase.org>
- Hainz, R., Wöber, C., Schagerl, M., 2009. The relationship between *Spirogyra* (Zygnematophyce, Streptophyta) filament type groups and environmental conditions in Central Europe. *Aquatic Botany* 91, 173–180.
- Ижболдина Л.А., 2007. Атлас и определитель водорослей бентоса и перифитона озера Байкал (мейо- и макрофиты) с краткими очерками по их экологии - Новосибирск: Изд-во "Наука", 248 с.
- Рундина Л.А., 1998. Зигнемовые водоросли России. Санкт-Петербург: Наука, 351 с.
- Тимошкин О.А., Медвежонкова О.В., Троицкая Е.С., Тютрин А., Ямамура М., 2017. Динамика температуры воды в прибрежной зоне озера Байкал (западная часть южной котловины). Электронная база данных, Сертификат Российской Федерации № 2017620374. URL: <http://lin.irk.ru/temperature/web/index.php>

- Волкова Е.А., Бондаренко Н.А., Тимошкин О.А., 2015. Новые сведения о видах *Spirogyra* (Zygnematomphyceae, Streptophyta) в озере Байкал. Тезисы Международной Конференции «Проблемы систематики и географии водных растений». Филигран, Ярославль, стр. 21–22.
- Timoshkin O.A., 2016. Ecological crisis in coastal zone of lake Baikal (East Siberia): short description and reasoning // Third International Symposium of Benthological Society of Asia; Dalnauka Publ., Vladivostok, Russian Federation, August 24-27, 2016; pp. 157–160.
- Volkova, E., Bondarenko, N., Tomberg, I., Timoshkin, O., 2013. Intensive growth of *Spirogyra fluviatilis* Hilse (Streptophyta): structural changes in the benthic flora of lake Baikal coastal zone, East Siberia. Abstract book of the ECSA 53: Estuaries and Coastal Areas in Times of Intense Change.



A _____



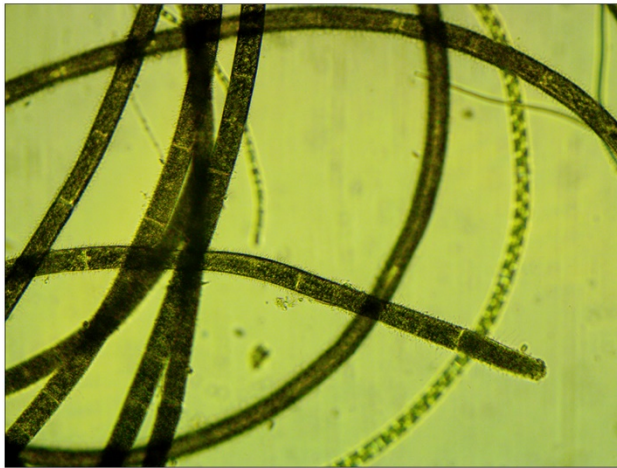
B _____



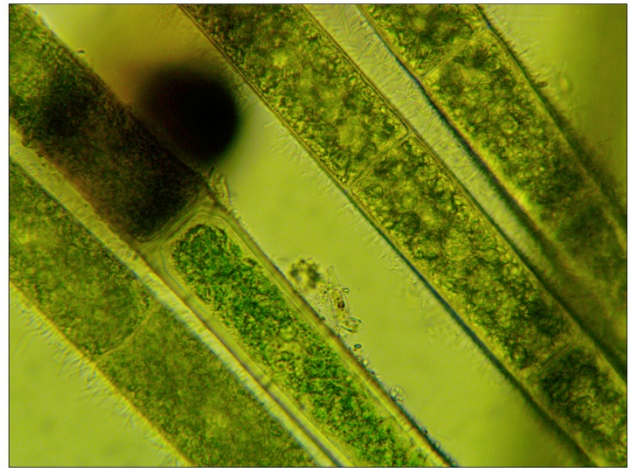
C _____



D _____



E _____



F _____

Рисунок S1. Фотографии *Spirogyra* sp. “морфотип 1” со светового микроскопа: молодые (A–D) и зрелые нити (E–F, конденсированные хлоропласты), с ризоидами (A), конъюгирующими клетками (B, D) и зигоспорами (D). Залив Большие Коты, вблизи пирса В, глубина 1.5 м, 31 августа 2015 г. (A–D) и 29 октября 2015 г. (E–F). Масштаб: A, C, E = 0.5 мм, B, D = 0.2 мм, F = 0.1 мм.



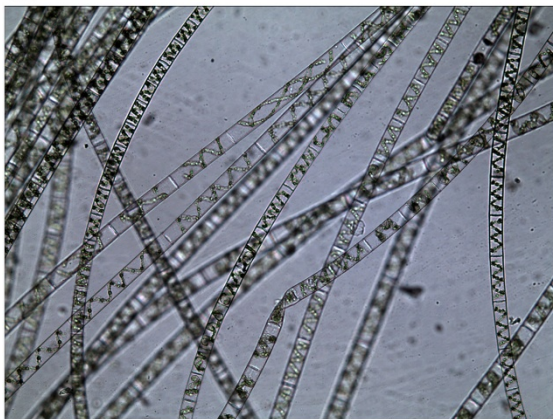
A



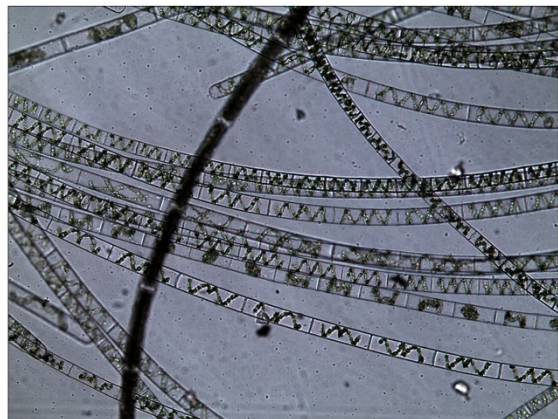
B



C



D



E

Рисунок S2. *Spirogyra* sp. «морфотип 2»: А–В — свободно-плавающие «облака» водорослей; С — подводные облака вблизи устья реки; D, E — фотографии нитей со светового микроскопа. Речка Черная (рис. 1), 20 сентября, 2015 г. Масштаб: D, E = 0.5 мм.

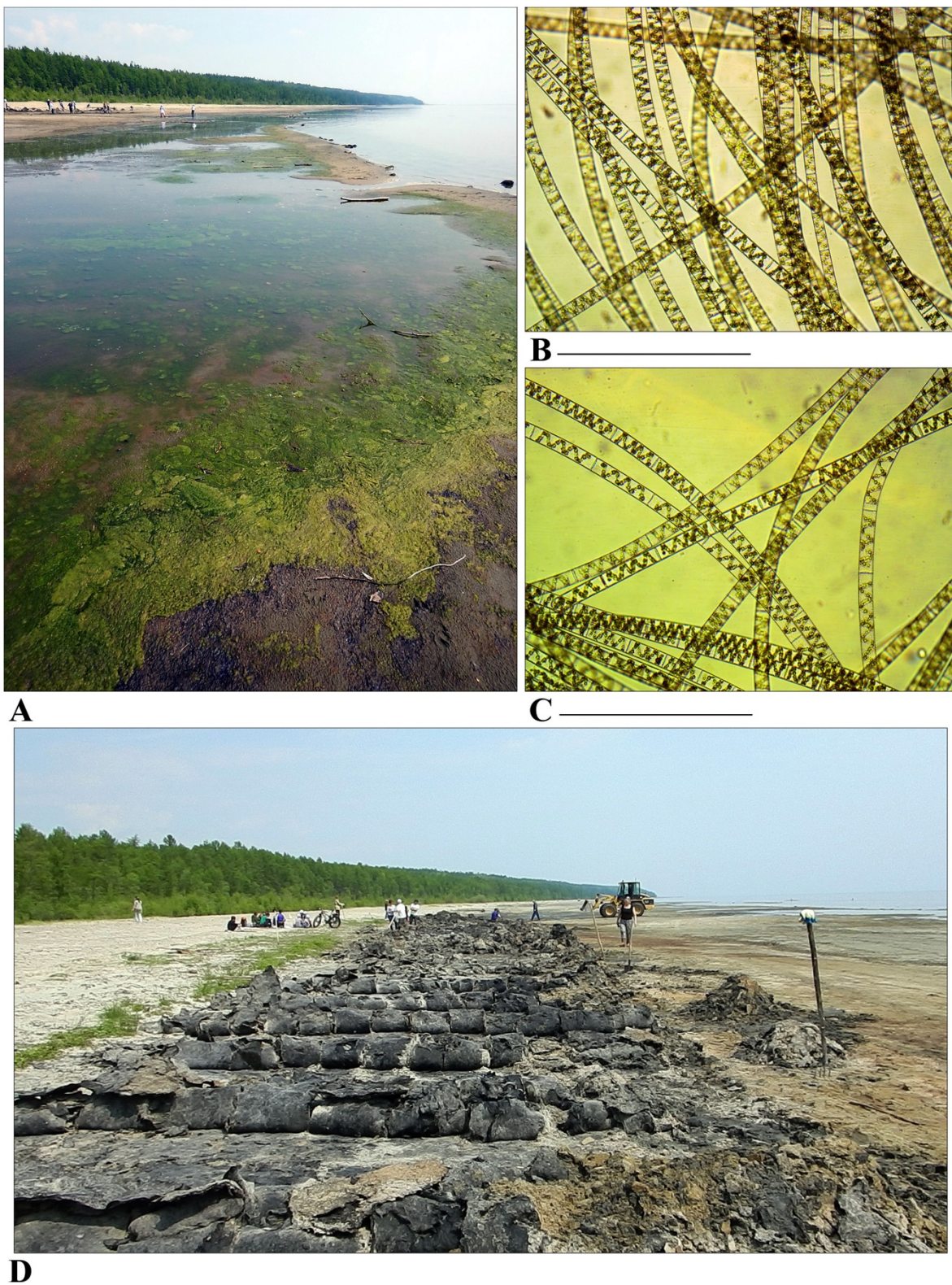
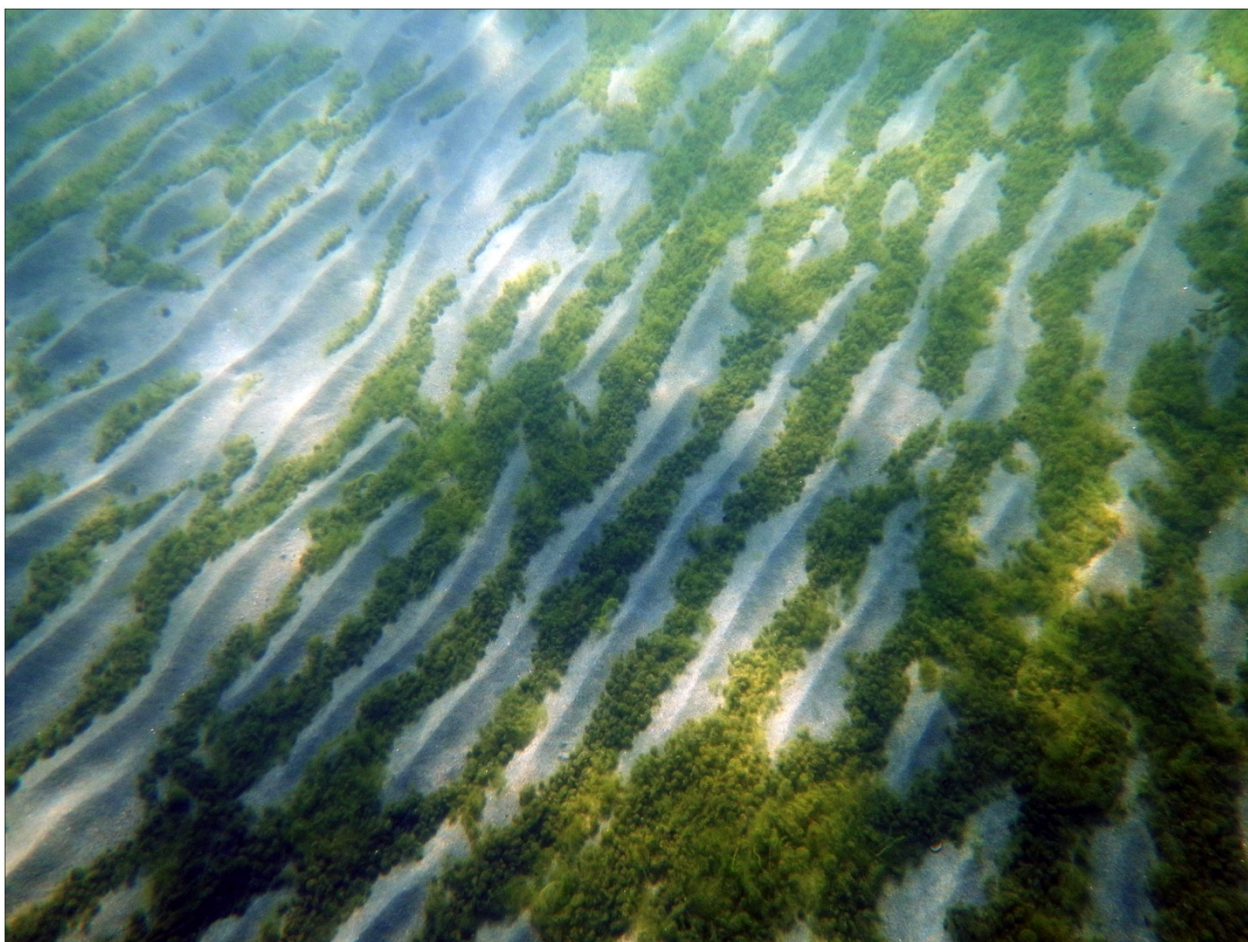
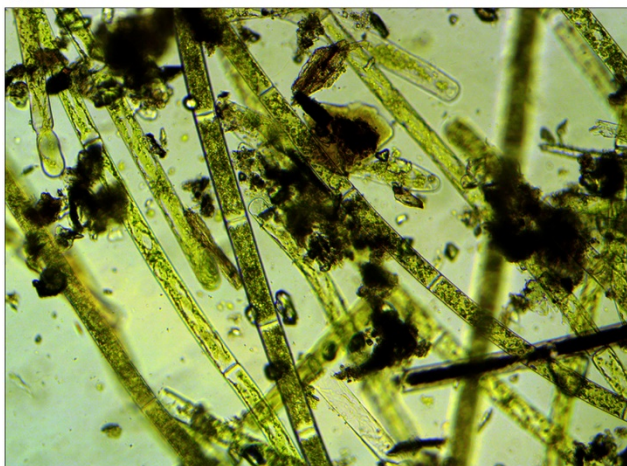


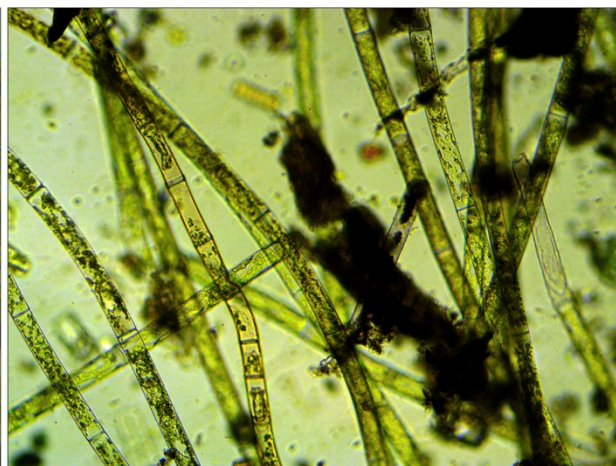
Рисунок S3. Свободно-плавающие *Spirogyra* “морфотип 2” в бухте Сеногда, 18 июня 2016 г. А (слева) — вид сверху береговых скоплений *Spirogyra*, лето 2016. В, С — фотографии нитей со светового микроскопа. D — уборка разлагающихся водорослей волонтерами из города Северобайкальска. Масштаб: В, С = 0.5 мм.



А



В

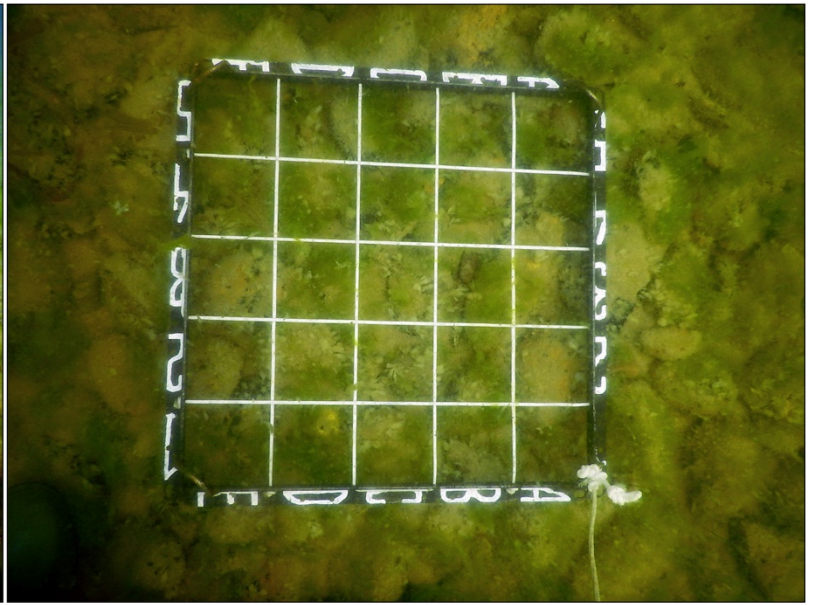


С

Рисунок S4. Подводные шарики водорослей на песчаном субстрате, глубина 0.5 м, напротив села Заречное примерно в 3 км к западу от реки Тья, 25 сентября 2016 г. А — общий вид. В, С — фотографии нитей нескольких морфотипов *Spirogyra*, *Oedogonium* sp., детрита и других зеленых нитчатых водорослей, из которых состоят эти шарики, сделанные при помощи светового микроскопа. Масштаб: В, С = 0.5 мм.



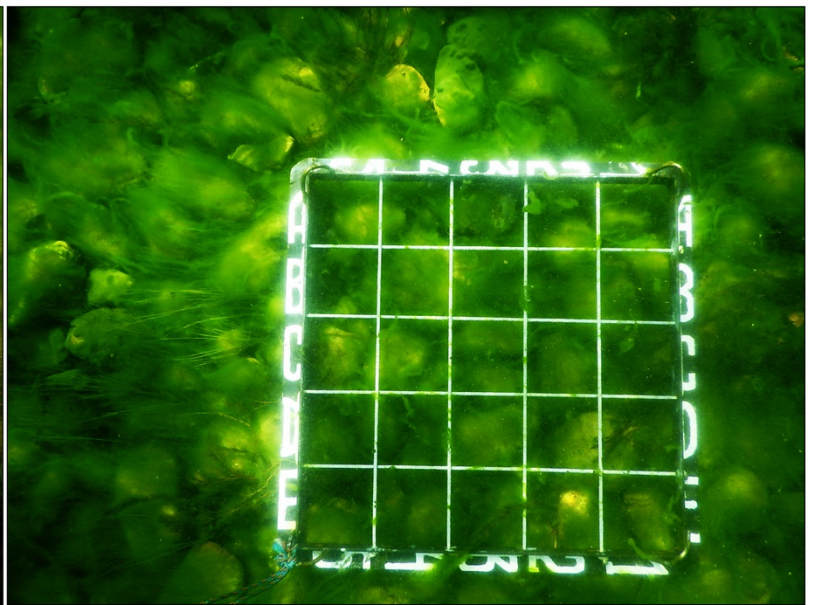
A



B



C



D

Рисунок S5. Подводные фотографии цветения бентосных водорослей в прибрежной зоне залива Большие Коты, глубина 1.5 м, вблизи пирса В (см. рис. 4). Июль 23, 2016 (A–B): массовое развитие типичного байкальского комплекса бентосных водорослей (в основном *Didymosphenia*, *Ulothrix*, *Chrysophyceae* spp.) и август 31, 2016 (C–D), когда *Spirogyra* «морфотип 1» покрывала 80–100%

субстрата дна. Размер рамки: 50 X 50 см. Подробности смотри в тексте.

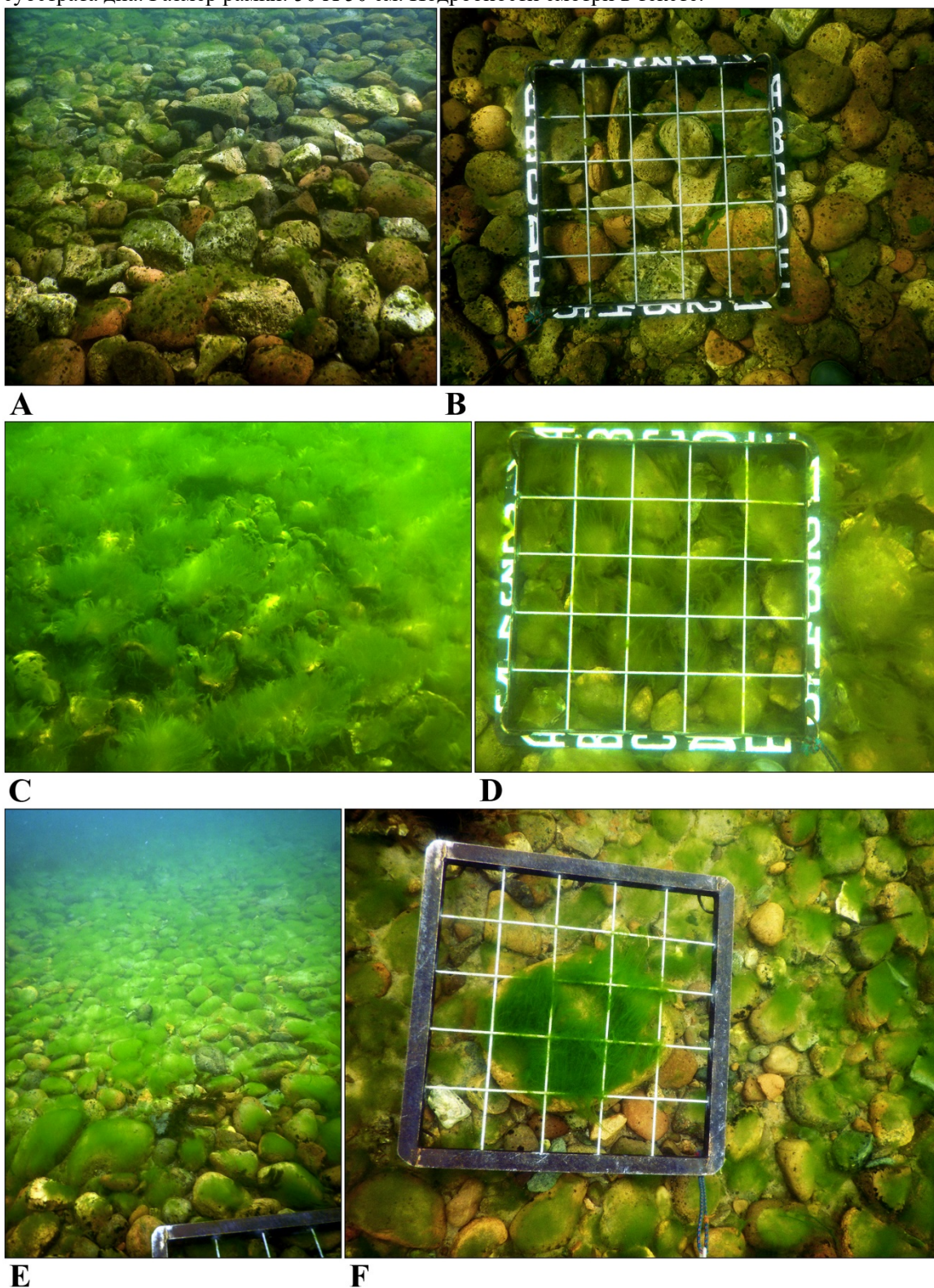
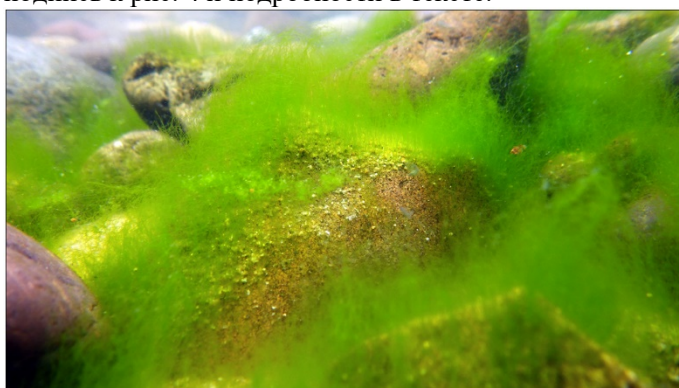
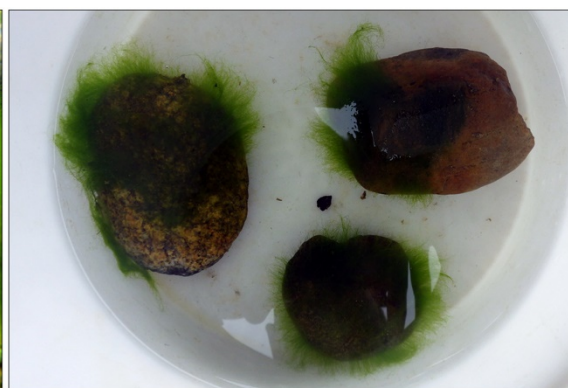


Рисунок S6. Подводные фотографии массового развития бентосных водорослей (преимущественно, *Spirogyra* “морфотип 1”) в прибрежной зоне залива Большие Коты, глубина 1.5 м, примерно 200 м к югу от пирса А (А–В), где нет строений вблизи береговой линии и пирса В (С–F) перед полевым стационаром Иркутского Госуниверситета. Сентябрь 20, 2016 (А–D) и октябрь 21, 2016 (Е–F). Смотри

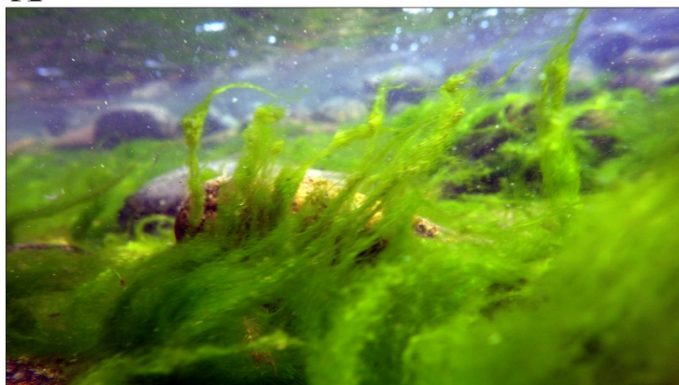
подпись к рис. 4 и подробности в тексте.



А



С



В



Д

Рисунок S7. Снимки под водой и сверху камней с молодыми (А, С) и зрелыми (В, D) *Spirogyra* “морфотип 1” из «пятна ЛПС». Фотографии сделаны в конце июля-августе (А, С) и сентябре 2015 г. (В, D), соответственно. Масштаб: С = 10 см.

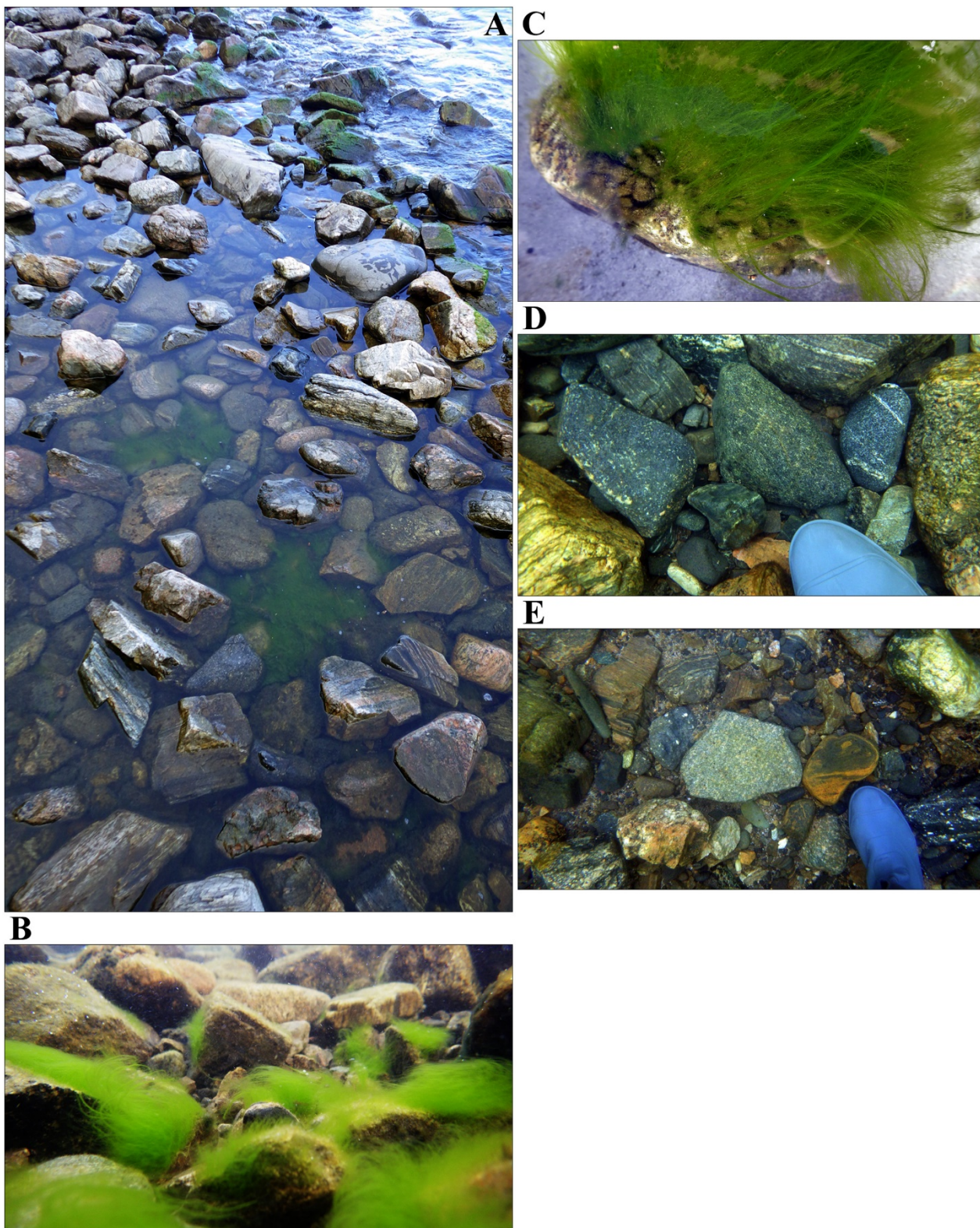


Рисунок S8. Пятна *Spirogyra* “морфотип 1” развивались в лужах выше береговой линии в бухте Емельяниха, западное побережье Южного Байкала (рис. 1). А–С — вид сверху и под водой, глубина 0.2 м. D, E — [каменистое] дно [самого] озера (камни за пределами пятна водорослей, глубина 0.5 и 1.5 м, соответственно) в том же месте. Сентябрь 15, 2015.



Рисунок S9. Пятно *Spirogyra* “морфотип 1” (“пятно ЛПС”), октябрь 29, 2015 г. Это то же пятно, обозначенное на рисунках 6 и S2, однако, уровень озера снизился. Размер рамки: 50 X 50 см. Подробности в тексте.

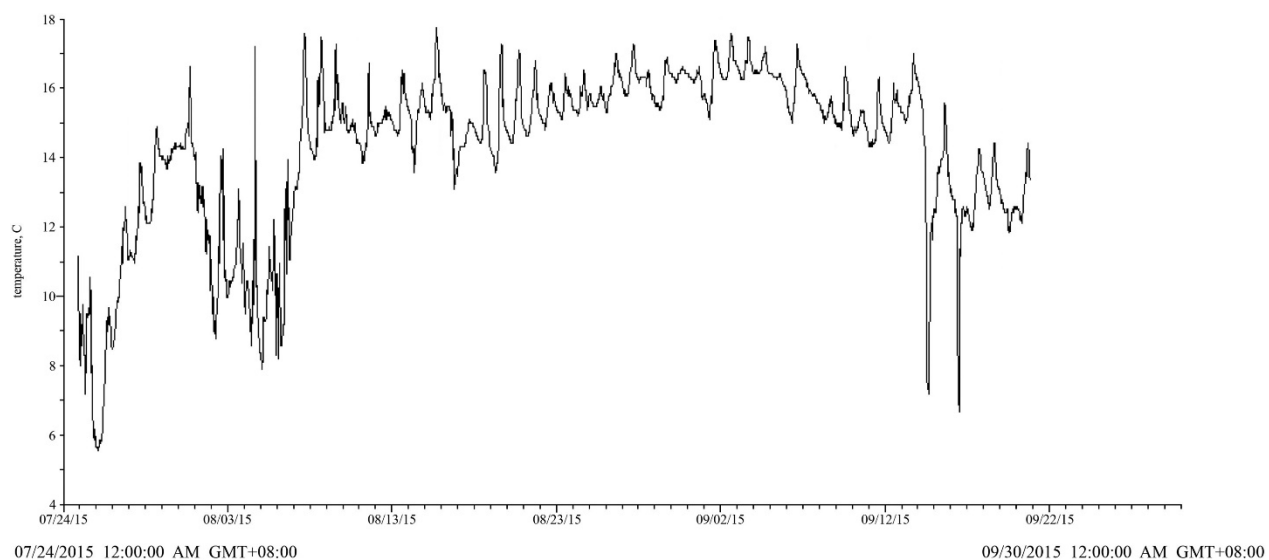


Рисунок S10. Колебания температуры придонной воды (°C) на глубине 3 м (типичная для массового роста *Spirogyra*) в заливе Большие Коты, озеро Байкал, за 30-дневный период летом 2015 г. Датчик температуры помещен возле пирса А, см. рисунок 4.