

Journal of Great Lakes Research

Быстрые изменения экологии прибрежной зоны оз. Байкал (Восточная Сибирь): находится ли величайшее в мире пресноводное биоразнообразие под угрозой?

О.А. Тимошкин^{a*}, Д.П. Самсонов^b, М. Ямомура^c, М.В. Мур^d, О.И. Белых^a, В.В. Мальник^a, М.В. Сакирко^a, А.А. Широкая^a, Н.А. Бондаренко^a, В.М. Домышева^a, Г.А. Федорова^a, А.И. Кочетков^b, А.В. Кузьмин^a, А.Г. Лухнев^a, О.В. Медвежонкова^a, А.В. Непокрытых^a, Е.М. Пасынкова^b, А.Е. Побережная^a, Н.В. Потапская^a, Н.А. Рожкова^a, Н.Г. Шевелева^a, И.В. Тихонова^a, Е.М. Тимошкина^a, И.В. Томберг^a, Е.А. Волкова^a, Е.П. Зайцева^a, Ю.М. Зверева^a, А.В. Купчинский^a, Н.А. Букшук^a

^a Лимнологический институт СО РАН, Улан-Баторская 3, Иркутск, Россия

^b НПО Тайфун, ул. Победы 4, Обнинск 249038, Россия

^c Докторантура передовых наук, Токийский университет, строение 562, 5-1-5 Кашиваноха, Кашива 277-8563, Япония

^d Отделение биологических наук, Уэсли Колледж, Уэсли, МА 02481, США

Тезисы

Ухудшение экологического состояния прибрежной зоны является новой неотложной проблемой оз. Байкал (Восточная Сибирь), самого богатого видами озера на Земле. В течение последних 5 лет произошли многочисленные изменения в прибрежном бентосном сообществе, в котором проживает большинство эндемичных видов озера. В число этих изменений входят: распространение бентосных водорослей, гибель моллюсков и эндемичных губок, обширные береговые выбросы мертвых бентосных водорослей и макрофитов, цветение бентосных цианобактерий, продуцирующих токсины, а также поступление в отдельные части озера промышленных загрязняющих веществ. Некоторые изменения, такие как массивные береговые скопления бентосных водорослей, в настоящее время наблюдаются также в Великих озерах Северной Америки (Великие озера), однако факторы, обуславливающие эти изменения в Байкале и в Великих озерах различны. Причиной проблем, наблюдаемых во многих местах оз. Байкал, является эвтрофикация прибрежной зоны, вызванная поступлением неочищенных сточных вод, тогда как в Великих озерах внедрение чужеродных моллюсков – дрейссенид – привело к перенаправлению питательных веществ из пелагиали в литораль. В других местах оз. Байкал, ухудшение экологической обстановки может быть вызвано иными причинами, в том числе колебаниями уровня озера и поступлением токсичных промышленных загрязняющих веществ. Важным является то обстоятельство, что и на Байкале, и в Великих озерах наблюдаемое в последнее время ухудшение состояния бентоса прибрежной зоны произошло практически без изменения состояния удаленных от берега участков. Это указывает на необходимость мониторинга как литоральной, так и пелагической зон крупных озер для оценки благополучия экосистем, происходящих в них изменений и их сохранения.

Текущее экологическое состояние прибрежной зоны одного из величайших озер нашей планеты – оз. Байкал (Восточная Сибирь, Россия) – заставило нас написать этот обзор. Мы желаем проинформировать мировое лимнологическое сообщество об отрицательных экологических процессах, с каждым годом все более активно протекающих в оз. Байкал. Это славное озеро вмещает в себя огромное количество чистой питьевой воды и характеризуется необычным разнообразием эндемичных форм жизни (Vereshchagin, 1940; Kozhov, 1963; Timoshkin, 2001). А говоря точнее, Байкал содержит пятую часть всех пресных вод земного шара в жидкой форме. Всего лишь через пятнадцать лет, согласно прогнозам Организации объединенных наций, человечеству потребуется на 40% больше питьевой воды, чем способны обеспечить природные ресурсы (The United Nations World Water Development Report, 2015). Поэтому оз. Байкал становится стратегически важным как в региональном, так и в общечеловеческом масштабах. Однако, возможно наиболее важным в глобальном масштабе является то, что оз. Байкал занимает первое место среди озер благодаря исключительному таксономическому разнообразию; в нем описано более 2660 видов и подвидов животных и более 1000 видов и подвидов

растений, при этом около 60% видов животных являются эндемиками (Timoshkin, 2011). Исходя из этого, озеро является идеальной природной лабораторией для исследования вопросов эволюции и процессов формирования эндемичных видов.

Большая часть биоразнообразия древних озер сконцентрирована в их прибрежных зонах (Kostoski et al., 2010; Vadeboncoeur et al., 2011; von Rintelen et al., 2012), что подтверждается и оз. Байкал, где наибольшее разнообразие видов встречается на мелководьях на глубинах от 1 до 50 м (Timoshkin, 2001; Timoshkin et al., 2004; Semernoy, 2007). В этом биотопе по периметру всего озера в настоящее время происходят быстрые изменения; некоторые из ключевых изменений имеют параллели с теми, что происходят в Великих Озерах Северной Америки. Какое влияние эти негативные процессы, происходящие в оз. Байкал, включая массовое развитие и распространение бентосной нитчатой водоросли рода *Спирогира*, окажут на первичных и вторичных консументов, а также на качество воды? Исследования только начались и вопросов, пока что, больше чем ответов. Ученые еще не пришли к единому мнению о масштабах, происхождении (естественном или антропогенном), или причинах происходящих процессов. Интервью ученых и статьи в СМИ нередко противоречат друг другу. К настоящему моменту мировое научное сообщество имеет очень мало информации. Более того, в ежегодной отчете Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, ответственного за мониторинг озера Байкал, озаглавленном «О состоянии озера Байкал и о мерах по его защите» (Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2014) утверждается в заключении, что «состояние экосистемы озера Байкал в 2013 г. не претерпело значительных изменений...» (с. 362). Это заключение, основанное только на данных отбора проб из удаленной от побережья акватории озера, не верно. Интересен тот факт, что и в других странах государственный мониторинг фокусируется на удаленной от побережья пелагической зоне, практически игнорируя прибрежную зону. Например, недостаточный мониторинг прибрежных вод Великих озер заставил власти США и Канады при последней ревизии Соглашения о контроле качества воды Великих озер (2012 г.) призвать к формированию концепции мониторинга прибрежной зоны (“Nearshore Framework”), в которую входят углубленное изучение и мониторинг прибрежных экосистем всех Великих озер.

Что касается озера Байкал, ученые предложили план мониторинга прибрежной зоны, основанный на ландшафтно-экологическом подходе (Timoshkin et al., 2005, 2009), и это предложение нашло поддержку у мирового лимнологического сообщества на конференции SIL 2004 в Лахти, Финляндия. Мониторинг прибрежной зоны осуществлялся с 2000 по 2003, однако финансовые трудности помешали дальнейшему проведению широкомасштабных работ в последующие годы вплоть до 2010. Тем не менее, прибрежная зона (включая заплесковую) все еще не включена в государственный мониторинг даже в 2016 г. Как результат, у населения и неправительственных экологических организаций отсутствует четкое понимание происходящего в прибрежной зоне озера, а также того, что им необходимо предпринять для защиты как себя, так и озера от последствий этих негативных явлений.

Поэтому критически важно информировать каждого о реальном состоянии дел и предполагаемых причинах кризиса. В этой связи, цель настоящего сообщения – использовать результаты последнего пробоотбора для описания текущей экологической ситуации в прибрежной зоне озера.

Значительные изменения структуры и количественных характеристик мелководных бентосных сообществ (включая заплесковую зону) были обнаружены в ходе междисциплинарных исследований прибрежной зоны по периметру всего Байкала (Timoshkin et al., 2014; дополнительные ссылки, публичные лекции и интервью первого автора можно загрузить с www.lin.irk.ru и <http://www.lin.irk.ru/hydrobiology/my-vsmi>). В виду недостаточного финансирования с 2007 по 2012 гг. пробоотбор осуществлялся нерегулярно и был ограничен двумя участками в южной котловине озера – в районе Больших Котов и в Лиственничном заливе. Результаты этого пробоотбора опубликованы в 13 статьях (для обзора см. Timoshkin et al., 2012a–c). Были сделаны сообщения о таксономическом составе и качественных характеристиках макрофито- и зообентоса, планктонных сообществ, а также о гидрохимических, гидрологических и микробиологических параметрах поровых, придонных и поверхностных вод мелководной зоны (Kulikova et al., 2012; Popova et al., 2012; Potapskaya et al., 2012; Rozhkova et al., 2012; Timoshkin et al., 2012b; Tomberg et al., 2012; Vishnyakov et al., 2012; Volkova et al., 2012; Zvereva et al., 2012; Sheveleva et al., 2013; Bondarenko et al., 2015). Кроме того, начиная с 2013 г. было проведено несколько кругобайкальских весенне-летних и осенних экспедиций.

Так, когда же началось ухудшение состояния окружающей среды или, когда это ухудшение стало явным? Так как до 2010 г. отбор проб в мелководных сообществах в масштабах всего озера не проводился, можно дать только приблизительный ответ. Наиболее вероятно, что заметные изменения в бентосных сообществах начались в 2010–2011 гг., при этом наиболее явно они проявили себя в сообществах макрофитобентоса (Kravtsova et al., 2012, 2014; Timoshkin et al., 2014, 2015). Мониторинг макроводорослей проводился с помощью: 1) метода «коротких» трансект (на глубинах от 0 до 1,5 м; % покрытия и биомасса на единицу камня) (Nakashizuka and Stork, 2002), а также метода квадратов (0,1 и 0,25 м²); сопровождаемых фото- и видеофиксацией; 2) ныряния с аквалангом (на глубины от 1,5–7–10 м); 3) драгирования (на глубинах 20–25 м). Большая часть образцов 2014 и 2015 гг. все еще обрабатывается. Описания сезонной и межгодовой динамик будут представлены в будущих публикациях. Заключение об изменениях в макрозообентосных сообществах (кроме губок, см. ниже) могут быть сделаны только после завершения проводимых в данное время количественных анализов. Хронология и краткое описание нетипичных и/или негативных экологических процессов, происходивших в промежутке между 2010 и 2015 гг., приведены ниже и вызывают опасения, что прибрежные экосистемы испытывают постоянный стресс.

Изменения зонирования и видового состава бентосных макроводорослей. Значительные крупномасштабные изменения сообществ бентосных макроводорослей были отмечены двумя независимыми группами исследователей в 2010–2011 гг. в двух заливах в южной котловине озера (Большие Коты и Лиственничный). А именно, зеленые нитчатые водоросли (*Spirogyra* spp. и *Stigeoclonium tenue*) в этих двух местах распространились на участки и глубины, нетипичные для озера Байкал. Начиная с конца июля и по конец ноября Спирогира экстенсивно росла на глубинах от 0,5 до 10 м, а обильное позднее цветение *Stigeoclonium tenue* происходило у уреза воды или в первом водорослевом поясе, который обычно бывает занят зеленой нитчатой водорослью *Ulothrix zonata* (по типичным для Байкала поясам бентосных водорослей см. таблицу 1).

В 2013–2014 гг. массовое развитие спирогиры наблюдалось осенью в мелководной зоне в большинстве обследованных участков озера (рис. 1, 2, 3). Проще указать те места, где эта водоросль не была обнаружена: остров Большой Ушканий, большая часть

побережья острова Ольхон (кроме бухты Перевозной и района п. Хужир), а также северно-западное побережье от мыса Елохин до пролива Малое море (рис. 1). Интересно также то, что близкие к побережью пелагические воды этой части северо-западного берега характеризовались самыми низкими концентрациями хлорофилла по сравнению с любым другим районом озера в летний период (Izmet'eva et al., 2016), что указывает на минимальное антропогенное воздействие. Даже в районе острова Ольхон, в основном свободном от спирогиры в 2014 г., массовое развитие этой водоросли было отмечено в двух, подверженных антропогенному воздействию точках – бухта Перевозная, в которой причаливает паром, и бухта Шаманка возле п. Хужир. В 2015 г. массовый рост спирогиры был отмечен во множестве новых участков вдоль западного берега Байкала (бухты Емельяниха, Сенная, и на противоположном берегу у мыса Половинный), а также в проливе Малое море (например, побережье у п. Сахюрта и залив Карганте, рис.1). Летом *Spirogyra spp.* массово развивалась и даже доминировала в бентосных сообществах макроводорослей практически вдоль всего восточного берега, а осенью – во множестве мест на западном берегу Байкала. Неожиданным стало то, что Спирогира – сравнительно термофильная водоросль (оптимальная для роста температура около 20 °С) – обнаруживалась в течении осени (сентябре – октябре), когда температура воды составляла всего лишь 4–8 °С. Два исследованных до настоящего момента участка (например, залив Лиственничный в южной котловине и берег между устьем речки Тья до бухты Сеногда в северной) характеризовались круглогодичным массовым развитием *Spirogyra spp.*, с включением иногда других видов нитчатых водорослей, нетипичных для открытых побережий озера Байкал (см. дополнительные электронные материалы (ДЭМ), видео 1). Проведенное осенью

Таблица 1

При нормальных условиях озеро Байкал характеризуется хорошо выраженной зональностью бентосных водорослей. В каждом из пяти поясов или зон доминируют 1-2 вида, включая эндемики (Meyer, 1930; Izboldina, 1990), и эти пояса хорошо выражены с начала весны и до конца осени. Приведенные ниже пояса начинаются с ближайшего к урезу воды и заканчиваются самым глубоководным. Верхняя граница пояса, населенного нитчаткой *Ulothrix zonata*, зависит от колебаний уровня воды и четко им определяется в течении сезона открытой воды.

Пояс	Глубина, м	Доминирующие виды бентосных водорослей
1	0 – 1,5	<i>Ulothrix zonata</i> (Web. et Mohr.) Kuetz. (зеленая водоросль)
2	1,5 – 2,5	<i>Tetraspora cylindrica</i> var. <i>bullosa</i> C. Meyer (зеленая водоросль) и <i>Didymosphenia geminata</i> (Lyngb.) M. Schmidt (диатомовая водоросль)
3	2,5 – 20	<i>Draparnaldioides</i> C. Meyer et Skabitsch. (зеленая эндемичная водоросль)
4 – 5	20 – 70	<i>Cladophora</i> Kuetz. (зеленые водоросли с некоторыми эндемичными видами)

2013 г. драгирование в северной котловине (например, в бухте Богучанской и напротив устья реки Тья) показало, что *Spirogyra spp.* проникает в озеро до глубин 10–20 м. Биомасса мокрых водорослей в 2013–2014 гг. колебалась между 100 и 1500 г/м², что соответствует или даже выше зарегистрированной биомассы туземных байкальских водорослей, обычно населяющих первый и второй водорослевые пояса Байкала (таблица 1). Также каждую осень 2013–2015 гг. на камнях у уреза воды в многих местах всех трех котловин озера наблюдалось массовое развитие стигеоклониума. Прежде стигеоклониум встречался в небольших количествах в августе – сентябре на глубинах 1–2,5 м, а также в некоторых из притоков Южного Байкала (Izboldina, 2007).

Рост биомассы бентосных макроводорослей. В 2015 г. биомасса типичных для Байкала бентосных макроводорослей в мелководных зонах существенно возросла. Например, биомасса водорослей по сырому весу первого растительного пояса (таблица 1), в котором обычно доминирует типичный вид прибрежной зоны, *Ulothrix zonata*. Однако, в некоторых местах Северного Байкала (на север от мыса Елохин) его биомасса достигала от 3 до 5 кг/м², что в 6–10 раз выше величин, описанных ранее (Izhboldina, 1990: максимум июня – 0,5 кг/м²).

Массовое развитие бентосных цианобактерий. В некоторых районах озера имело место массовое развитие цианобактерий, которое сопровождалось распространением некоторых видов на отмирающие макроводоросли (*Draparnaldioides spp.*) и губки. Значительные количества нитей бентосных *Oscillatoriales* и *Nostocales* (первый автор, личные наблюдения) были обнаружены в донных пробах, взятых с глубин 10–15 м на юг от бухты Песчаная (Южный Байкал) летом 2013 и 2014 гг. Массовое цветение бентосных видов родов *Phormidium*, *Oscillatoria*, *Tolypothrix* и других наблюдалось также на мелководных участках бухты Большие Коты и Баргузинского залива, а также в иных местах. Ранее (2010–2012 гг.), похожие *Oscillatoriales* и *Nostocales* были обнаружены на погибающих макроводорослях эндемичного рода *Draparnaldioides* (*Chlorophyta*) в конце вегетативного сезона (Timoshkin et al., 2012a: p. 47–48). В течении последних 2–3 лет, похожие цианобактерии (преимущественно рода *Phormidium*) массового развивались на погибающих губках рода *Lubomirskiidae*. Поэтому мы назвали их «эпибионтными» цианобактериями. По нашим исходным данным, собранным в октябре 2014 г. в бухте Большие Коты (с глубины 5 м, шприцевый пробоотборник), концентрации ортофосфата в воде вблизи ветвей умирающей губки колебались в диапазоне от 0,213 до 0,97 мг/л, тогда как в придонном слое воды эти концентрации составляли от 0,038 до 0,045 мг/л. Мы выдвинули гипотезу, что цианобактерии колонизируют преимущественно эти умирающие организмы, так как они являются источником питательных веществ. Еще одно изменение было зафиксировано в сентябре 2015 г., когда виды родов *Tolypothrix* и *Oscillatoria*, а также некоторые другие цианобактерии массового развились на камнях в зоне прибоя и недалеко от нее, иногда в значительных количествах проникая в самую верхнюю границу пояса *Ulothrix zonata* и вытесняя оттуда эту туземную зеленую нитчатую водоросль (рис. 4А–F). Биомасса бентосных цианобактерий по сырому весу была очень высока, достигая порой 195,1 г/м². В годы, предшествующие большинству этих экологических изменений *Tolypothrix spp.* наблюдались только во втором и третьем растительных поясах, при этом их общая биомасса по сырому весу не превышала 87 г/м² (Izhboldina, 2007). Подобное массовое цветение *Oscillatoriales* и *Nostocales* в первом растительном поясе отмечается впервые.

Для проверки на возможное наличие нейротоксичных цианотоксинов (например, сакситоксина, STX и его аналогов, объединяемых под паралитическими токсинами моллюсков, PST), нами были проанализированы с помощью аналитического набора Abraxis Saxitoxin (PSTs) ELISA kit (Abraxis LLC, USA) 12 проб бентосных цианобактерий, отобранных в мае, июле и сентябре 2015 г. в прибрежной зоне бухты Большие Коты (рис. 1: участок 7). Ранее мы уже с успехом применяли этот метод для обнаружения сакситоксина в планктонных цианобактериях озера Байкал (Belykh et al., 2015a, 2015b). Присутствие STX и его аналогов в образцах бентосных цианобактерий было также подтверждено с помощью метода матрично-активированной лазерной десорбционно-ионизационной масс-спектрометрии (MALDI-TOF-MS), описанного Belykh et al. (2015b). Этот метод позволил идентифицировать в бентосных цианобактериях следующие

паралитические токсины моллюсков: сакситоксин (STX), неосакситоксин (NeoSTX), а также гониатоксин (GTX5), содержащие карбомиловые группы, декарбомиловые производные сакситоксина (dcSTX), неосакситоксина (dcNeoSTX) и гониатоксина (dcGTX2/3, dcGTX1/4), а также два соединения, известные как токсины *Lyngbia wollei* (LWTXs).

Концентрации STX во всех 12 образцах бентосных цианобактерий озера Байкал, измеренные с помощью набора ELISA, колебались в диапазоне от 0,2 до 141,5 мкг/г сухого веса. Максимальные концентрации токсина были обнаружены в пробах цианобактерий, взятых с камней у уреза воды (рис. 4B–F). Средние концентрации STX в бентосных цианобактериях озера Байкал схожи с концентрациями, зафиксированными у бентосных цианобактерий озер Новой Зеландии (Smith et al., 2011, 2012), что от 10 до 6000 раз выше концентраций, характерных для цианобактерий арктических водоемов (Kleinteich et al., 2013), но в то же время существенно ниже, чем у чистых культур бентосных цианобактерий, выделенных из озер Новой Зеландии (*Scytonema cf. crispum*, Smith et al., 2012) и водохранилищ Северной Америки (*Lyngbya wollei*, Yin et al., 1997). В озере Байкал контакт человека с внутриклеточным сакситоксином бентосных цианобактерий маловероятен, разве что токсины не успевают разложиться после гибели клетки до ее разрушения и после лизиса попадают в водную толщу. Последствия попадания сакситоксин-продуцирующих цианобактерий с пресной водой внутрь организмов бентосных беспозвоночных, диких животных, собак или сельскохозяйственных животных, кормящихся у уреза воды или пьющих оттуда воду, не известны, но потенциально очень опасны, потому что сакситоксин является мощным нейротоксином.

Обширные береговые скопления бентосных водорослей и макрофитов. Впервые в 2013-2014 гг. были обнаружены необычайно большие береговые скопления гниющих водорослей *Spirogyra spp.*, цианобактерий, *Cladophora glomerata*, *Elodea* и другой водной растительности, биомасса которых по сырому весу иногда достигала 90 кг/м². Эти скопления находились в заплесковой зоне северной котловины (например, песчаное побережье между устьем реки Тья и бухтой Сеногда) (ДЭМ видео 1), в Чивыркуйском (д. Монахово) и Баргузинском заливах (п. Максимиха, спортивный лагерь «Ровесник»), в Малом море (п. Сахюрта и бухта Шида), и в южной котловине (например, побережье у п. Култук) (рис. 1, 5 A–B).

Обширные прибрежные скопления, состоящие преимущественно из бентосных цианобактерий (*Tolypothrix spp.* и т.п.) были впервые обнаружены в Баргузинском заливе (возле мыса Горевой Утес, рис.1: участок 30). Общий сырой вес этих береговых скоплений цианобактерий, занимавший участок площадью около 120 м², превышал 1,2 тонн. С помощью световой микроскопии было обнаружено, что в них преобладали цианобактерии *Tolypothrix spp.*, похожие на те, что доминировали в бухте Большие Коты (рис. 4E–F). Обширные береговые скопления встречаются теперь в конце лета и осенью. Однако, одно из таких скоплений (преимущественно из типичных для этого района макроводорослей) было обнаружено, также впервые, в начале июня 2015 г. вблизи пролива Малое Море (напротив п. Сахюрта, рис. 1: участок 13). По-видимому, сезонные максимумы развития местных видов водорослей теперь встречаются раньше, чем прежде.

Массовая гибель моллюсков. Миллиарды мертвых моллюсков (преимущественно представителей семейства *Lymnaeidae*) и их пустые раковины были обнаружены в 2013–2014 гг. на песчаных пляжах северной котловины между устьем реки Тья и бухтой

Сеногда (рис. 6А–В). Эти «кладбища» были расположены вблизи участка, подверженного воздействию сточных вод г. Северобайкальск, там же где активно развивались маты спирогиры. В июне 2015 г., менее обширные скопления раковин лимнеид и эндемичных байкалиид, а иногда и вальватид и бенедиктиид, были обнаружены в заплексовой зоне Баргузинского залива в районе п. Максимиха.

Болезнь и массовая гибель эндемичных губок рода Lubomirskiidae. Различные типы заболеваний байкальских губок встречаются повсеместно в озере, впервые они были описаны 2013–2014 (Bormotov, 2011; Timoshkin et al., 2014). Исходя из данных более чем 50 погружений в 2014 г. и 40 в 2015 г. поражены все три экологические формы губок (рис. 7А–В, 8 А–С; ДЭМ видео 2). В зависимости от места обитания от 30 до 100% ветвистых форм вида *Lubomirskia baicalensis* больны, повреждены либо мертвы. Согласно др. Бёдекеру (Университет им. королевы Виктории, Новая Зеландия, личное сообщение), такая ситуация наблюдается до границы 15–20 м в большинстве исследованных районов южной котловины (сентябрь 2014). Более глубоководные виды ветвистых губок выглядели здоровыми. В июне 2015 г., однако, нездоровыми выглядели и более глубоководные ветвистые губки. Др. А.Б. Купчинский, нырявший в 28-29 октября 2014 г. напротив Черной речки (южнее бухты Большие Коты, примерно в 350 м от побережья; рис 1: участок 7), отметил, что 95% губок вида *Lubomirskia baicalensis* были повреждены либо больны до глубины 5 м, тогда как около 80% этих животных на глубинах от 6 до 14 м выглядели здоровыми.

Как уже описано выше, ухудшение состояния губок сопровождается массовым развитием эпibiонтных цианобактерий *Phormidium spp.* (рис. 8С; ДЭМ видео 3) (Timoshkin et al., 2014). Подвижные нити сравнительно большого размера (3,8–7,5 мкм Ø), вишнево-красного цвета, дистальный конец нитей немного искривлен. Анализ, проведенный средствами световой микроскопии, показал, что каждый пораженный участок поверхности отдельной губки населен численно доминирующими (90–95%) 1–3 видами цианобактерий. В большинстве случаев (50–80%), деформация и повреждение внешней поверхности губки (в частности оскулюма) имеет место еще до их колонизации цианобактериями и их последующего массового развития. По предварительным данным ветвистые губки, преобладающие в южной котловине (в частности в Лиственничном заливе, бухте Большие Коты, устье Черной речки) наиболее подвержены этому заболеванию. Например, 100% губок вида *Lubomirskia baicalensis*, населяющих устье Черной речки вдоль нашей стандартной донной трансекты (1 × 10 м; на глубинах 3–12 м; июнь 2015; ДЭМ видео 2) были повреждены, больны либо мертвы. Наименее поврежденные или даже здоровые губки вида *L. baicalensis* были найдены вдоль северо-западного побережья (примерно между мысом Елохин и проливом Большие Ольхонские ворота). Примечательно, что именно этот участок побережья был в 2014 и 2015 гг. свободен от зарослей спирогиры; интересно также и то, что, в водной толще этого района обнаруживались наименьшие концентрации летнего фитопланктона, чем в любом другом месте озера согласно многолетним наблюдениям (Izmest'eva et al., 2016).

Присутствие бактерий-индикаторов свежего фекального загрязнения в прибрежной зоне. Высокие концентрации бактерий-индикаторов свежего фекального загрязнения, превышающие государственные стандарты США, России и Европы (ЕРА, 1986; СанПиН, Санитарные нормы и правила Российской Федерации, 2000; Official Journal of the European Union, 2006), зафиксированы в конце туристического сезона (сентябрь, 2014) в большинстве местностей, в поверхностном и придонном слоях воды, а также в поровых водах, особенно под прибрежными водорослевыми матам в заплексовой зоне (в

указанных официальных документах какие-либо регламентации по поровой воде пляжей и заплесковой зоны отсутствуют). Типичные примеры бактерий-индикаторов свежего фекального загрязнения приведены на рис. 9. Например, пробы воды, взятые вблизи п. Хужир превышают нормы Агентства охраны окружающей среды США по *E. coli* в 3,3 раза и по *enterococci* в 10,7, стандарты ЕС в 3,1 (*E. coli*) и 6,5 раз (*enterococci*), а нормы Российской Федерации в 6 раз (только по термотолерантным колиформным бактериям; энтерококки не регулируются). Важно, что все три прибрежных поселка, где были обнаружены наивысшие концентрации бактерий-индикаторов свежего фекального загрязнения (рис. 1: участок 4 (п. Листвянка), 16 (п. Хужир), и 25 (бухта Хакусы, 10 км на юг от бухты Ая)) расположены каждый в разных котловинах озера, и их постоянное население сравнительно мало. Однако, они относятся к одним из наиболее посещаемых туристами мест на озере Байкал. Кроме того, частные дома и гостиницы в п. Листвянка (около 2000 постоянных жителей; около 300 000 посетителей в 2014 г.) не канализованы и не имеют очистных сооружений. То же самое верно и для п. Хужир (1350 постоянного населения; 500 000 посетителей 2014 г.), являющегося «столицей» и туристической «Меккой» самого большого на Байкале острова Ольхон, и для бухты Хакусы (около 20 постоянных обитателей; более 1000 посетителей в 2014 г.), являющейся центром рекреации с горячими источниками, используемыми жителями городов и поселков Северного Байкала. Эти результаты предполагают, что основной причиной свежего фекального загрязнения побережья озера Байкал является увеличение числа туристов, и интенсификация рекреационной деятельности вкупе с ненадлежащей очисткой сточных вод.

Загрязнение прибрежной зоны хлорорганикой. Наличие хлорорганических загрязняющих веществ в водной толще и в организмах установлено с помощью хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения с ионным разведением (DFS HR, Agilent 7200 Q-TOF) на основе методик 1668 и 1699, утвержденных Агентством охраны окружающей среды (EPA, 2003, 2007). Предварительные анализы позволяют сделать следующие выводы.

Макроводоросли мелководной зоны биоаккумулируют липофильные хлорорганические соединения, процесс зафиксированный и в отношении морских экосистем (Malmvärn et al., 2008; Lupsor et al., 2009). Концентрации некоторых хлорорганических пестицидов (например, дихлорбифенилдихлорэтилена, нонахлора, токсафена) в биомассе мертвых нитчатых зеленых водорослей родов *Ulothrix* и *Spirogyra* были в 1000–5000 раз выше, чем в воде. Общие концентрации полибромированных дифениловых эфиров (ПБДЭ) в нитях улотрикса, собранных во всех трех котловинах озера (n = 4), колебались в диапазоне 0,13–4,4 нг/г сухового веса, при том что их содержание в нитях спирогиры не превышало 0,03 нг/г (n= 3).

Эндемичные байкальские губки *Lubomirskia spp.* также биоаккумулируют хлорорганические пестициды. Если убрать из рассмотрения результатов анализа губок образцы с крайне высокими концентрациями хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов (ПХБ), то общая схема биоаккумуляции загрязняющих веществ сравнима с той, что показывают байкальские макроводоросли. Средние концентрации этих хлорорганических соединений в губках составляли примерно 9 нг/г (n=10). Некоторые образцы демонстрировали высокие общие концентрации (ПХБ) в диапазоне от 250 до 1000 нг/г сухого веса губки. Таким образом, влияние органических пестицидов следует принять в качестве одной из рабочих гипотез, объясняющих массовую гибель губок.

Концентрация и химический состав хлорорганических загрязняющих веществ в сточных водах г. Северобайкальск, а также в поровой воде заплесковой зоны к югу от города (т.е. в районе наибольшего распространения спирогиры (рис. 1: участки 21–23) и массовой гибели моллюсков (рис. 6)) существенно отличались от обнаруженных в других котловинах озера. Во-первых, концентрация общих ПХБ в очищенных стоках (т.е. 28 000 пг/л) была на порядок выше концентрации в озерных поверхностных водах. Во-вторых, пятихлористые ПХБ (такие как ПХБ99, ПХБ101, ПХБ105, ПХБ118), являющиеся типичными изомерами в воде всех трех котловин озера Байкал, возможно поступают в результате глобального переноса аэрозолей из удаленных источников, так как они некогда не использовались и не производились ни в СССР, ни в России. Однако, концентрации 3–или 4–хлористых ПХБ, и необычно высокие концентрации 6–хлористых ПХБ, входящих в состав технических жидкостей (например, трансформаторных масел, конденсаторных жидкостей и т.д.), были обнаружены в сточных и поровых водах г. Северобайкальск. Это указывает на местный источник этих ПХБ. По-видимому, это связано с мойкой вагонов в депо РЖД, сбрасывающем свои промышленные стоки в коммунальные очистные сооружения города. Эти сооружения были спроектированы только для очистки бытовых стоков и не способны надлежащим образом очищать промышленные.

К счастью, текущие концентрации хлорорганических загрязняющих веществ в водной толще пелагической зоны озера Байкал ниже международных нормативов. Однако, это маскирует важную проблему. Биологи экспериментально протестировали токсичность тысяч химических веществ, выделенных из водных экосистем, фокусируясь на содержании отдельных загрязняющих веществ. Тогда как в природе организмы подвергаются воздействию «коктейля загрязняющих веществ», и смесь различных хлорорганических соединений, состоящих из отдельных химикатов (в частности, пестицидов) в низких, соответствующих нормативам концентрациях, наносят существенный вред водным сообществам (Kortenkamp, 2008; Relyea, 2009; Servan-Schreiber, 2014). И хотя исследования синэргетического воздействия многочисленных загрязняющих веществ на пресноводные экосистемы становятся рутинной, они еще ни разу не были проведены в отношении уникальных и потенциально уязвимых сообществ озера Байкал. Таким образом, сброс «коктейля из хлорорганики» в литоральную зону Северного Байкала через неспособные к удалению хлорорганики коммунальные очистные сооружения г. Северобайкальск, может оказаться весьма опасным для уязвимой, эндемичной биоты.

Заключение

Многочисленные серьезные изменения произошли в прибрежных бентосных сообществах озера Байкал и некоторые из них, например, массовое распространение бентосных макроводорослей и присутствие токсичных цианобактерий, поразительно похожи на те, что произошли недавно в Великих озерах Северной Америки (Higgins et al., 2008; Steffen et al., 2014). Как и в Великих озерах, так и в озере Байкал эти изменения влияют или способны повлиять на экономическую деятельность и здоровье населения. Важно, что ухудшение экологической обстановки прибрежных биотопов озера Байкал и Великих озер происходит при практическом полном отсутствии изменений в пелагиали (Shimaraev and Domysheva, 2013; Hecky et al., 2004). Это подчеркивает неотложную необходимость мониторинга не только пелагиали крупных водоемов, но и их литорали.

Движущая сила изменений, происходящих в озере Байкал, отлична от той, которая вызвала изменения экосистемы Великих озер. В Великих озерах текущие проблемы

прибрежной зоны, такие как массовое развитие бентосных водорослей рода *Cladophora*, являются результатом внедрения чужеродных моллюсков дрейссенид, которые перенаправили биогенные элементы из пелагиали в бентосную литоральную зону (Nesky et al., 2004; Higgins et al., 2008) и увеличили прозрачность воды путем своей фильтрационной активности (Malkin et al., 2008). Напротив, изменения в экосистеме Байкала не связаны с инвазией чужеродных видов. Изменения, происходящие в большинстве прибрежных районов, согласуются с обогащением литоральной зоны питательными веществами, поступающими от бытовых стоков (Kravtsova et al., 2014; Timoshkin et al., 2014), то есть ситуация, напоминающая эвтрофикацию Великих озер в период с конца 1950х по начало 1970х. В те годы, избыток фосфора из бытовых стоков и фосфорсодержащих синтетических моющих средств стал причиной массового развития кладофоры в прибрежной бентосной зоне, однако ограничения, введенные в отношении точечных источников фосфора, в значительной степени помогли решить эти проблемы на период с начала 1970х по 1990е, когда внедрение дрейссенид снова привело к массовому развитию кладофоры (Higgins et al., 2008). Таким образом, минимизация последствий эвтрофикации литоральной зоны Великих озер в период с 1970х по 1990е позволяет сделать предположение, что существенное улучшение состояния прибрежной зоны озера Байкал может быть достигнуто путем строительства многочисленных очистных сооружений; однако, большинство эндемичных видов прибрежного бентоса этого олиготрофного озера могут иметь весьма высокую чувствительность, что потребует более строгого контроля биогенной нагрузки, чем в других пресноводных экосистемах. Более того, экологическая деградация прибрежной зоны разных участков озера Байкал может быть вызвана другими или множеством факторов, в том числе колебаниями уровня озера (Zohary and Ostrovsky, 2011), поступлением токсичных промышленных загрязняющих веществ (например, гибель губок может быть вызвана ими) (Mamontov et al., 2000), и, не исключено, глобальным потеплением (Moore et al., 2009).

Крайне важно быстрое определение причин этих серьезных изменений в экосистеме Байкала и принятие соответствующей программы мониторинга прибрежной зоны для защиты и сохранения биологического здоровья этого уникального великого озера, качества его воды, экономического и культурного значения. Исследование экологических изменений прибрежной зоны озера Байкал продолжается и будет представлено в будущем в ряде статей.

Дополнительны материалы по этой статье можно найти онлайн по ссылке: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>.

Благодарственное слово

Мы благодарим др. С. Инкена (Королевский нидерландский институт морских исследований, Нидерланды) за предоставление многочисленных видео и фото материалов. Мы также благодарны др. Теду Озерски (Университет Миннесоты, США) и анонимному рецензенту за их ценные и профессиональные замечания по черновому варианту статьи.

Отдельное спасибо академику М.А. Грачеву (Лимнологический институт СО РАН, Россия) за инициативу и поддержку проведения кругобайкальских экспедиций 2013–2015 гг. и, особенно, за финансовую поддержку исследований токсинов цианобактерий.

Работа профинансирована за счет государственного проекта Сибирского отделения Российской академии наук № VI.51.1.10 «Современное состояние, биоразнообразие и

экология прибрежной зоны озера Байкал», проекта РФФИ № 13–04–01270, и гранта для проведения научных исследований (КАКЕНHI) (№ 15H05112).

Ссылки

Belykh, O.I., Gladkikh, A.S., Sorokovikova, E.G., Tikhonova, I.V., Potapov, S.A., Butina, T.V., 2015a. Saxitoxin-producing cyanobacteria in Lake Baikal. *Contemp. Probl. Ecol.* 8, 186–192.

Belykh, O.I., Gladkikh, A.S., Tikhonova, I.V., Kuz'min, A.V., Mogil'nikova, T.A., Fedorova, G.A., Sorokovikova, E.G., 2015b. Identification of cyanobacterial producers of shellfish paralytic toxins in Lake Baikal and reservoirs of the Angara River. *Microbiology* 84, 98–99.

Bondarenko, N.A., Malnik, V.V., Vishnyakov, V.S., Rozhkova, N.A., Sinyukovich, V.N., Gorshkova, A.S., Timoshkin, O.A., Matveev, A.N., 2015. Current state of biota in the Selenga River Delta (Lake Baikal basin) under unstable hydrological conditions. Part I. Microbial community and algae. *Hydrobiol. J.* 5, 17–28.

Bormotov, A., 2011. What has happened with Baikal sponges? *SCIENCE First Hand* 5, 20–23.

EPA, 1986. Ambient aquatic life water quality criteria for bacteria, 1986. US EPA, EPA440/5–84-002.

EPA, 2003. Method 1668, Revision A: Chlorinated biphenyl congeners in water, soil, sediment, biosolids, and tissue by HRGC/HRMS, August 2003. EPA-821-R-07-004, pp. 1–124.

EPA, 2007. Method 1699: Pesticides in water, soil sediment, biosolids, and tissue by HRGC/HRMS, December 2007. EPA-821-R-08-001, pp. 1–96.

Great Lakes Water Quality Agreement, 2012. Protocol amending the agreement between Canada and the United States of America on Great Lakes Water Quality, 1978, as amended on October 16, 1983, and on November 18, 1987. Signed September 7, 2012. Entered into force February 12, 2013. URL: http://www.ec.gc.ca/grandslacs/greatlakes/A1C62826-72BE-40DB-A545-65AD6FCEAE92/1094_Canada-USA%20GLWQA%20_e.pdf.

Hecky, R.W., Smith, R.E.H., Barton, D.R., Guildford, S.J., Taylor, W.D., Charlton, M.N., Howell, T., 2004. The nearshore phosphorus shunt: a consequence of ecosystem engineering by dreissenids in the Laurentian Great Lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 61, 1285–1293.

Higgins, S.N., Malkin, S.Y., Howell, E.T., Guildford, S.J., Campbell, L., Hiriart-Baer, V., Hecky, R.E., 2008. An ecological review of *Cladophora glomerata* (chlorophyta) in the Laurentian Great Lakes. *J. Phycol.* 44, 839–854.

Izhboldina, L.A., 1990. Meio- and Macrophytobenthos of Lake Baikal (Algae). Irkutsk State University Press, Irkutsk.

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.

Izmet'eva, L.R., Moore, M.V., Hampton, S.E., Ferwerda, C.J., Gray, D.K., Woo, K.H., Pislegina, H.V., Krashchuk, L.S., Shimaraeva, S.V., Silow, E.A., 2016. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal. *J. Great Lakes Res.* 42, 6–17.

Kleinteich, J., Wood, S.A., Puddick, J., Schleheck, D., Küpper, F.C., Daniel, D., 2013. Potent toxins in Arctic environments—presence of saxitoxins and an unusual microcystin variant in Arctic freshwater ecosystems. *Chem. Biol. Interact.* 206, 423–431.

Kortenkamp, A., 2008. Breast Cancer and Exposure to Hormonally Active Chemicals: An Appraisal of the Scientific Evidence. Chemical Health Monitor Alliance, London.

Kostoski, G., Albrecht, C., Trajanovski, S., Wilke, T., 2010. A freshwater biodiversity hotspot under pressure—assessing threats and identifying conservation needs for ancient Lake Ohrid. *Biogeosciences* 7, 3999–4015.

Kozhov, M.M., 1963. Baikal and Its Life. Bookpress, Irkutsk.

Kravtsova, L.S., Iziboldina, 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., Iziboldina, 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.

Kulikova, N.N., Suturin, A.N., Saybatalova, Ye.V., Boyko, S.M., Timoshkin, O.A., Domysheva, V.M., Paradina, L.F., Sakirko, M.V., Tomberg, I.V., Zaytseva, E.P., Malnik, V.V., Lukhnev, A.G., Popova, E.L., Popova, O.V., Potapskaya, N.V., Vishnyakov, V.S., Volkova, E.A., Zvereva, Yu.M., 2012. Biogeochemistry of the shore zone of Bolshye Kotybay (Southern Baikal). *Bull. Irk. State Univ.* 5, 75–87.

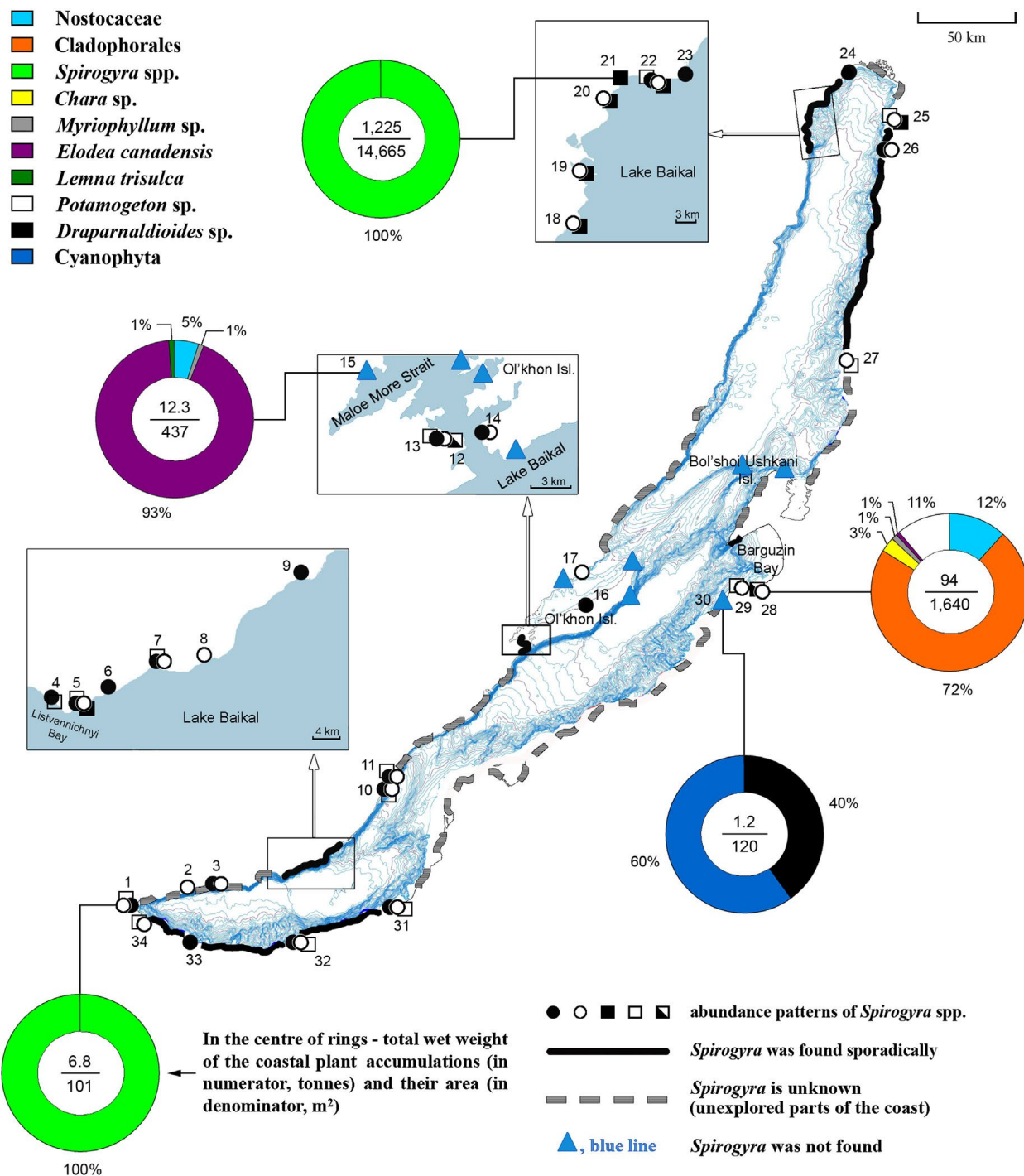


Рис. 1. Количественное и пространственное распределение *Spirogyra* spp. в Байкале в конце лета – начале осени, 2013–2015 гг., а также количественное распределение водорослей и высшей водной растительности в зоне прибоя (круговые диаграммы) в течении осенних сезонов 2013 и 2014 гг. Места отбора проб: 1 – п. Култук, 2 – Кругобайкальская железная дорога, 3 – мыс Половинный, 4 – п. Листвянка, 5 – бухта Обутенха, 6 бухта Емельяниха, 7 - бухта Большие Коты, 8 – бухта Сенная, 9 – п. Большое Голоушное, 10 – бухта Песчаная, 11 – бухта Бабушка, 12 – бухта Тутайская, 13 – п. Сахюрта, 14 – бухта Перевозная, 15 – бухта Шида, 16 – п. Хужир, 17 – залив Карганте, 18 – мыс Лударь, 19 – бухта Богучанская, 20 – бухта Онокованская, 21 бухта Сеногда, 22 – п. Заречное, 23 устье реки Тья, 24 – г. Нижнеангарск, 25 – бухта Ая, 26 мыс Амнундакан, 27 – бухта Давше, 28 – п. Максимиха, 29 – спортивный лагерь «Ровесник», 30 – мыс Горевой Утес, 31 – г. Бабушкин, 32 – п. Танхой, 33 – г. Байкальск, 34 – п. Слюдянка. Количественное распределение *Spirogyra* spp. под водой на глубинах до 0.5–1.5 м: черный кружок – >80–90% покрытия каменистого субстрата; белый кружок – небольшие пятна (3–10 см Ø) на каменистом субстрате; черные квадратики – свободно плавающие маты спирогиры (1–30 м длиной и 0,1–5,0 м шириной, <50% покрытия субстрата) на песчаном дне; белые квадратики – небольшие пятна (3–10 см Ø) на песчаном дне; перечеркнутые по диагонали квадратики – свободно плавающие скопления спирогиры (10–30 см Ø, <50% покрытия субстрата) среди высшей водной растительности на песчаном и/или илистом дне. Жирной черной линией выделены прибрежные области, где спирогира спорадически (показано на рис. 3) встречалась под водой. Круговые диаграммы показывают таксономический состав и количественное распределение в обнаруженных на берегу гниющих выбросах водорослей и высшей водной растительности.

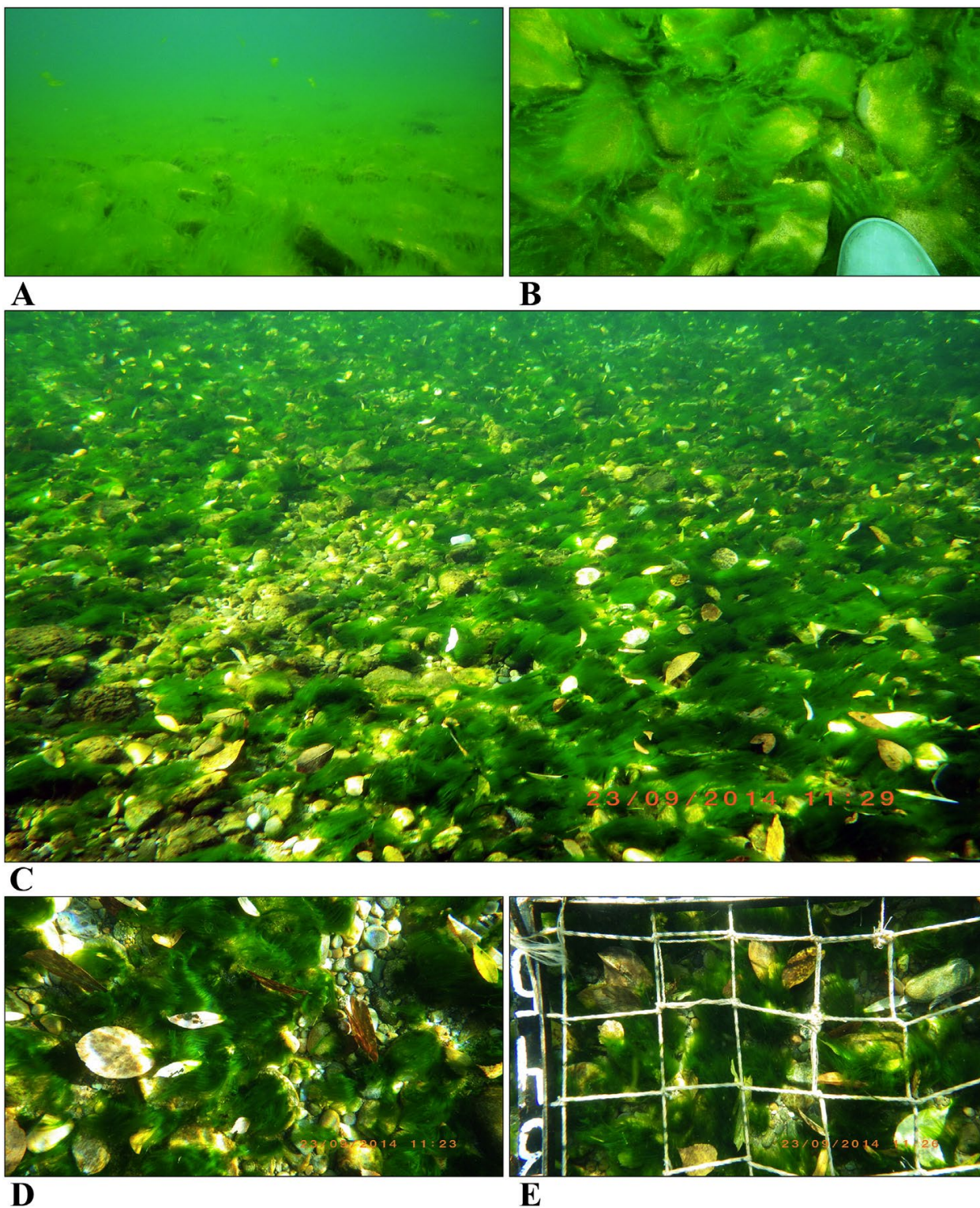


Рис. 2. А–Е. Массовое развитие спирогиры (>80–90% покрытия каменного субстрата) в прибрежной зоне озера Байкал в конце сентября 2014, на глубинах водной толщи 0,5–1,5 м. А–В. п. Большое Голоустное (рис. 1: участок 9). С–Е. Вблизи устья реки (рис. 1: участок 23). Фотографии на рис. 2-5 сделаны О.А. Тимошкиным.

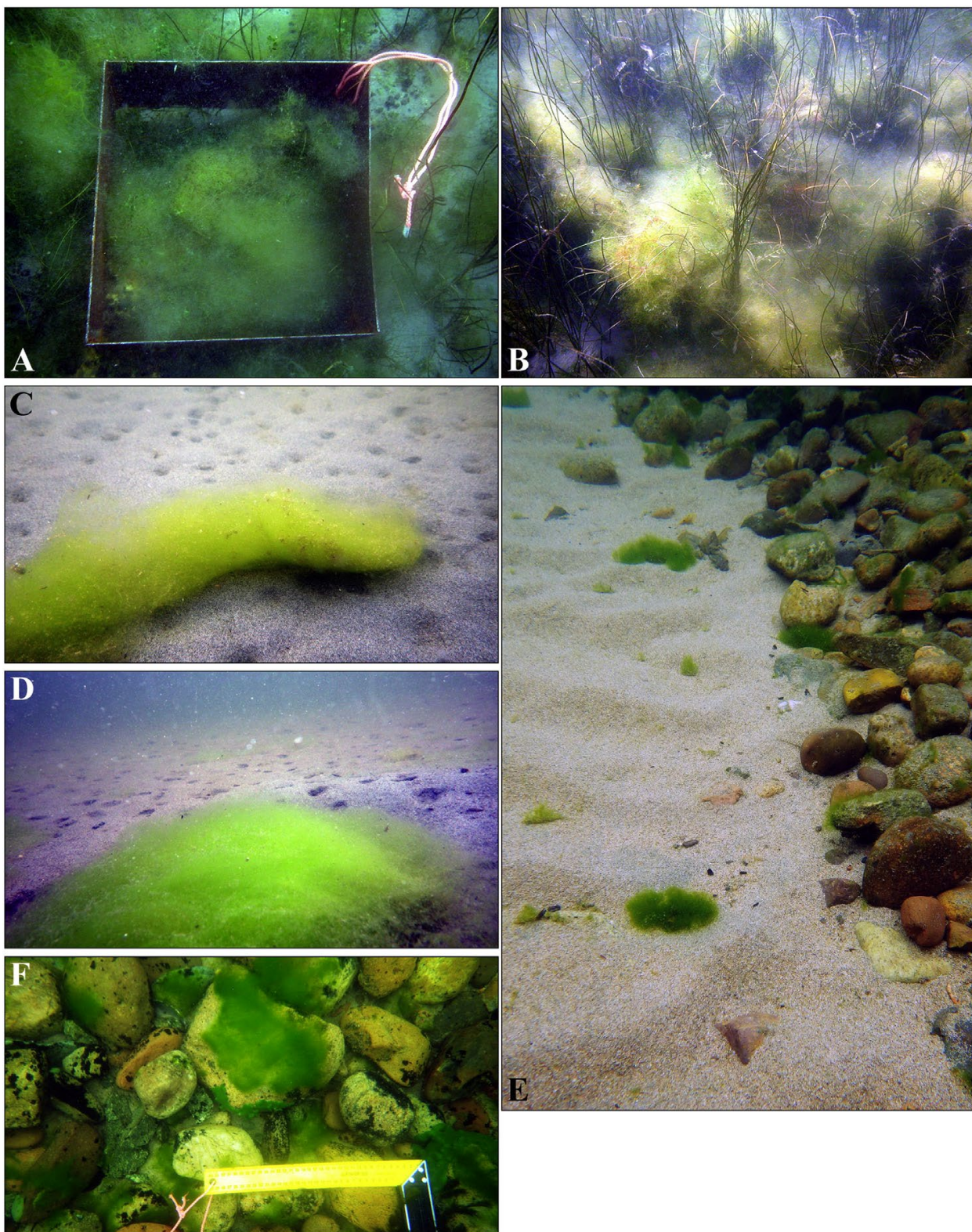


Рис. 3. А–F. Отдельные случаи обнаружения спирогиры в прибрежных районах озера Байкал. А–В. Свободно плавающие скопления спирогиры (10–30 см Ø, <50% покрытия субстрата) среди высшей водной растительности на песчаном дне. Бухта Тутайская (рис. 1: участок 12), 15 августа, 2013, глубина водной толщи 1,5–2 м (длина каждой из сторон рамки = 33,3 см, площадь = 0,1 м²). С–D. Свободно плавающие маты спирогиры (1–30 м в длину и 0,1–5 м в ширину, <50% покрытия субстрата) на песчаном дне вблизи п. Заречное (рис. 1: участок 22), июнь 2015, глубина водной толщи 0,5–1,5 м. Е–F. Небольшие пятна (3–10 см Ø) на песчаном (Е) и каменистом дне (F). Бухта Большие Коты (рис. 1: участок 7), конец августа – начало сентября 2015, глубина водной толщи 0,5–1,5 м.

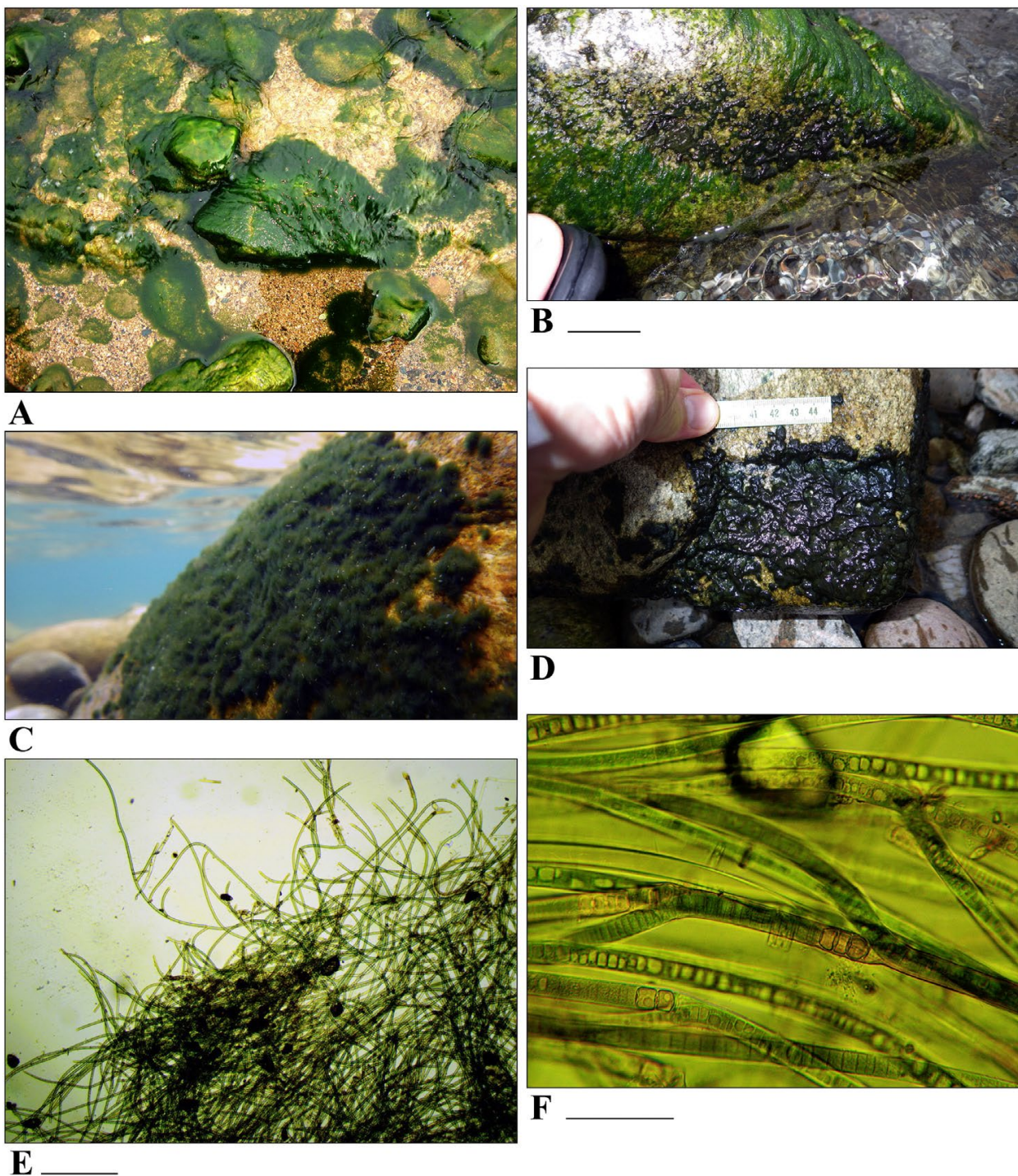


Рис. 4. А–F. До и после массового развития бентосных цианобактерий на камнях прибрежной зоны озера Байкал (верхняя зона первого растительного пояса), Южная котловина (бухта Большие Коты). А. Типичные камни прибрежной полосы, покрытые *Ulothrix zonata* без цианобактерий, 20 июля 2010 до начала экологических изменений в прибрежной зоне. В. Булыжник из прибрежной зоны, покрытый цианобактериями, *Tolypothrix spp.* (красновато-бурые хлопья), и *Ulothrix zonata* (яркие зеленые нити), 30 августа 2015 г., после начала экологических изменений. С–D. Подводные (около 20 см глубины) (С) и надводные (D) снимки хлопьев *Tolypothrix spp.* Е–F. Снимки под световым микроскопом перекрученных нитей *Tolypothrix*, доминирующего вида цианобактерий. Масштабная линейка: В—3 см, Е—360 мкм, F—60 мкм. Фотографии В–F сделаны 31 августа 2015.



Рис. 5. А–В. Обширные береговые скопления



Рис. 6. А–В. «Кладбища» моллюсков вдоль

<p>гниющей водной растительности. А. 16 октября, 2013, Северная котловина (бухта Сеногда). В. 15 сентября 2014, Средняя котловина (Баргузинский залив: спортивный лагерь «Ровесник», к западу от п. Максимиха.</p>	<p>западного побережья Северного Байкала (Бухта Сеногда, 29 мая 2014).</p>
--	--

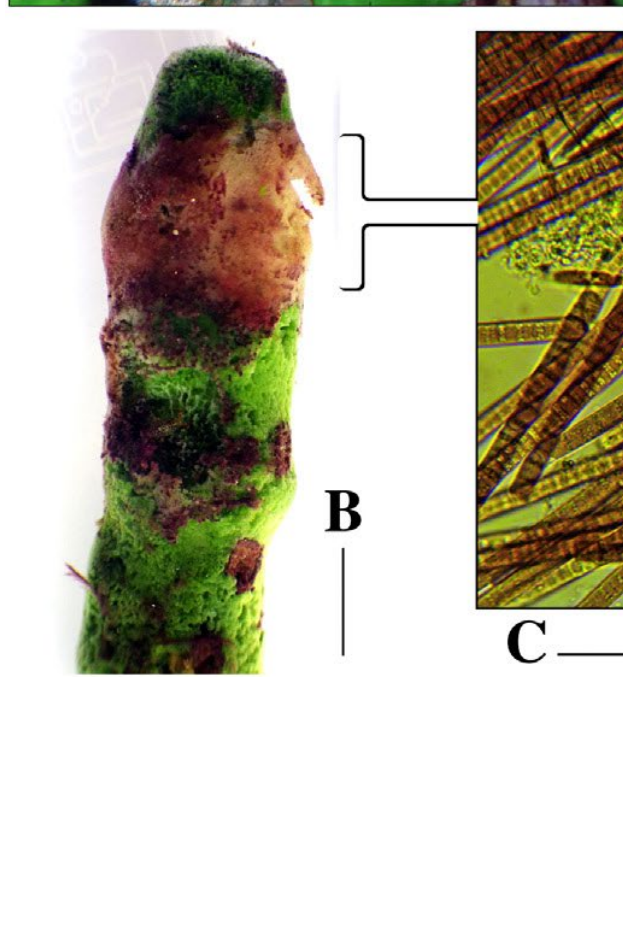


Рис. 7. А–В. А. Основные стадии болезни и гибели доминирующего эндемичного вида *Lubomirskia*

Рис. 8. А–С. А. Оскулом и другие участки корковой *Baicalospongia sp.* покрытые

<p><i>baicalensis</i> (Porifera) и пример массового развития бентосных <i>Tolypothrix spp.</i> (красно-бурые ковры на камнях), а также эпибионтных <i>Phormidium spp.</i> (темно-коричневые пятна на ветвях губок) в мелководной зоне Южного Байкала. 28 сентября 2014 г.; Большие Коты, напротив полевого стационара Лимнологического Института СО РАН, глубина 5,1 м (фото С. Инкена). Справа налево: 1 – внешне здоровые ветви с первыми признаками разрушения поверхности, часто располагающимися вокруг оскулюма; 2 – массовое развитие цианобактерий <i>Phormidium spp.</i> на больных ветвях (кольцеобразные формирования); 3 – ветви с некротизированными участками, населенными многочисленными видами <i>Hydra spp.</i> В. Здоровые образцы <i>L. baicalensis</i> их тех же самых мест и глубины. 6 июня 2006 г. (фото из научного архива О.А. Тимошкина).</p>	<p>эпибионтные <i>Phormidium spp.</i>, сентябрь 2014, Северный Байкал (фото С. Инкена). В. Больная ветвь <i>Lubomirskia baicalensis</i> с теми же обрастаниями. С. Нити <i>Phormidium sp.</i> из кольцеобразного обрастания <i>L. baicalensis</i> (снимок под световым микроскопом). 30 сентября 2014; Южная котловина (мыс Шаралгай, глубина 10–11 м) (фото О.А. Тимошкина). Масштабные линейки: В—1 см, С—20,8 мкм.</p>
--	---

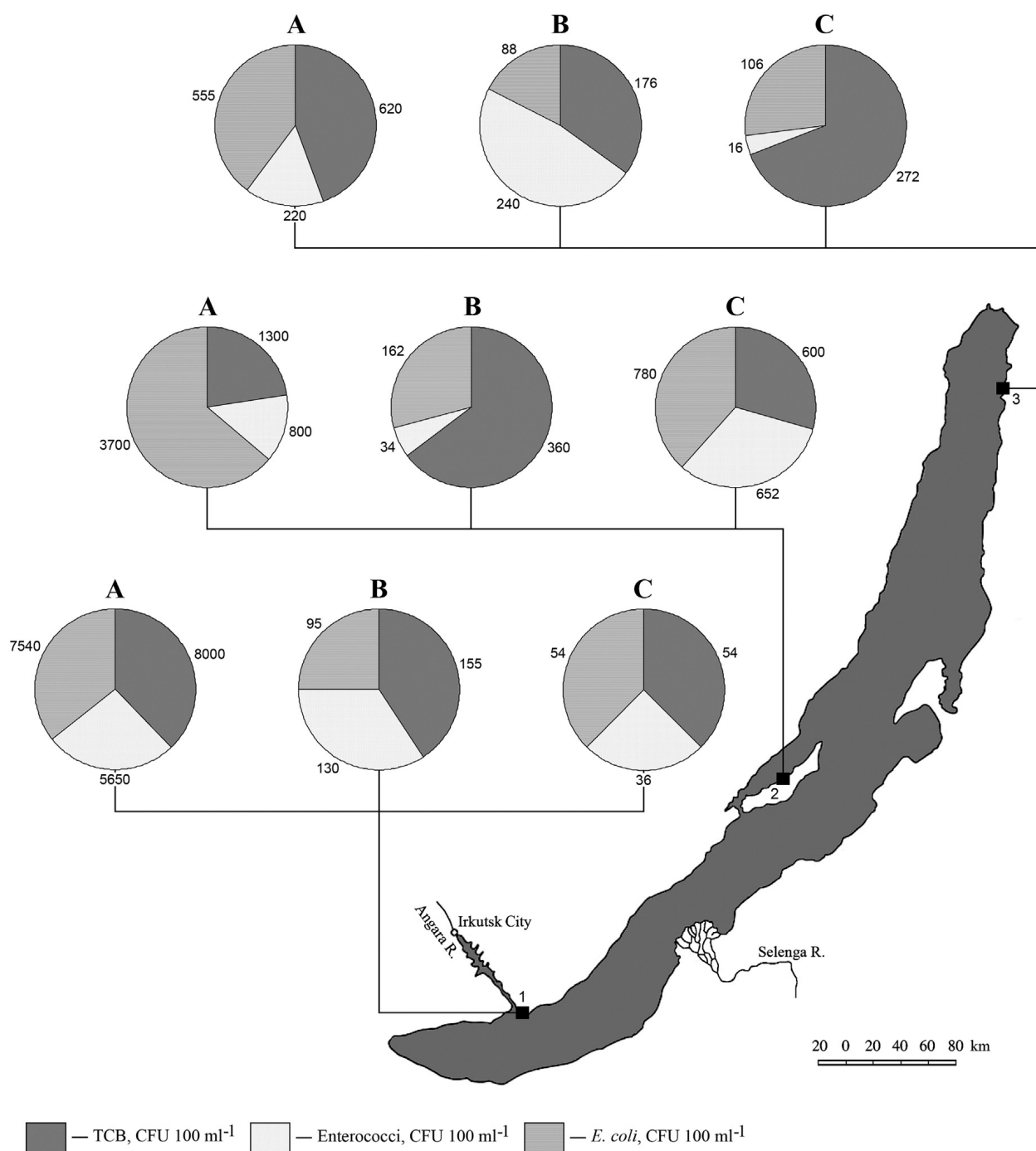


Рис. 9. Результаты подсчета бактерий-индикаторов свежего фекального загрязнения в прибрежной зоне озера Байкал в сентябре 2014 г. в трех точках (1 – п. Листвянка, 2 – п. Хужир, 3 – бухта Хакусы). Круговые диаграммы описывают относительные пропорции колониеобразующих единиц бактерий (КОЕ 100 мл) в поровой (А), поверхностной (В), и придонной воде (С) (слева направо соответственно) в каждой точке пробоотбора. ТКБ - термотолерантные колиформные бактерии.