



УДК 581.526.325.2

Токсичные цианобактерии в озере Байкал

О. И. Белых, А. С. Гладких, Е. Г. Сороковикова, И. В. Тихонова, С. А. Потапов

Лимнологический институт СО РАН, Иркутск
E-mail: belykh@lin.irk.ru

Аннотация. Впервые в оз. Байкал в прибрежной зоне пос. Турка обнаружены цианобактерии родов *Anabaena* и *Microcystis*, содержащие гены синтеза микроцистинов. Концентрация микроцистинов в воде, по данным иммуноферментного анализа, составила $0,17 \pm 0,01$ мкг/л. С помощью пиросеквенирования охарактеризован генетический и таксономический состав микробного сообщества Среднего Байкала, выявлены 3 936 нуклеотидных последовательностей фрагмента гена 16S рРНК. Установлено, что представители филы *Cyanobacteria* доминируют в составе летнего бактериопланктона литорали и пелагиали озера, при этом большее разнообразие наблюдается в планктоне литоральной зоны.

Ключевые слова: оз. Байкал, цианобактерии, пиросеквенирование, микроцистины, ген *mcyE*, иммуноферментный анализ.

Введение

Цианобактерии – кислородные фототрофные прокариоты, способные продуцировать широкий круг биологически активных веществ. Некоторые из них токсичны для человека и животных, вызывают острые отравления и заболевания ряда органов. Наиболее распространёнными токсинами в пресных водоёмах являются микроцистины (МС) – циклические гептапептиды, синтезируемые нерибосомно большим мультиферментным комплексом. МС поражают клетки печени, ингибируя серин/треонин фосфатазы, что приводит к гиперфосфорилизации белков цитоскелета гепатоцитов, потере клеточных контактов и возникновению обширных кровоизлияний в печени [14; 20]. МС продуцируют цианобактерии родов *Microcystis*, *Anabaena*, *Planktothrix*, *Anabaenopsis*, *Nostoc*, *Gloeotrichia* и *Hapalosiphon*. В настоящее время выявлено 90 изоформ МС, из которых МС-LR является наиболее токсичным [32]. Согласно рекомендации ВОЗ концентрация МС-LR в питьевой воде не должна превышать 1 мкг/л, а в водах для купания – 2–4 мкг/л [34].

Среди потенциально токсичных видов в Байкале встречаются *Microcystis aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. wesenbergii*, *Anabaena lemmermannii*, *A. flos-aquae*, *A. spiroides*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Gloeotrichia echinulata*. Эти виды достигают высокой численности в заливах и сорах, в некоторые годы в августе в пелагиали озера при длительной штилевой погоде

отмечали обширные поля цветений *A. lemmermannii*, *A. flos-aquae* [7].

Токсичные цветения цианобактерий зарегистрированы в более чем 25 странах мира, включая Россию [8; 10; 15; 24]. Исследования водоёмов Восточной Сибири, впервые начатые нами в 2005 г., показали, что токсигенные цианобактерии присутствуют в большинстве озёр и водохранилищ региона [1; 2; 17]. Цианобактерии, продуцирующие различные изоформы токсинов, ежегодно развиваются в оз. Котокельское, расположенном в 2 км от Байкала [3; 24].

Поиск токсичных цианобактерий и изучение состава микробных сообществ в пелагиали и литорали озера Байкал стали целью настоящей работы.

Материалы и методы

Цианобактерии получены из планктонных проб, отобранных в августе 2010 г. в Среднем Байкале на центральной станции разреза м. Ухан – м. Тонкий (глубина 1 562 м) и в прибрежной зоне в зал. Турка (глубина 7 м) с использованием батометров с глубин 5, 10, 15 и 25 м и сети Апштейна с поверхности, в литорали отбор проб производили только с поверхности. С каждого горизонта отбирали по 200 мл воды и сливали для получения интегральных проб, затем фильтровали через поликарбонатные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм («Millipore», США). При использовании сет-

ных проб материал фиксировали этанолом (конечная концентрация 70 %).

ДНК цианобактерий выделяли методом фенол-хлороформной экстракции. Пиросеквенирование образцов произведено на приборе Roche/454 Genome Sequencer FLX Titanium компанией ChunLab Inc. (Национальный университет Сеула, Корея). Амплификацию фрагмента гена 16S рРНК проводили, используя зубактериальные праймеры 9F и 541R [30]. Анализ полученных последовательностей проводили согласно алгоритму, описанному ранее [6].

Для выявления *msuE*-гена синтез микроцистинов применяли универсальные праймеры *herF* и *herR* [19]. Детально методика описана ранее [3; 24]. Уникальные последовательности депонированы в GenBank под номерами JF837306-11.

Наличие МС в пробах воды определяли методом иммуноферментного анализа (ИФА), используя набор Microcystins-ADDA ELISA kit («Abraxis LLC», США) согласно инструкции производителя. Обработка результатов производилась с использованием программы RIDA® SOFT Win.

Результаты

В августе в пелагиали озера наблюдалась прямая температурная стратификация. Температура воды на поверхности на разрезе м. Ухан – м. Тонкий составляла 9,3 °С, на глубине 25 м – 5,9 °С, прозрачность по диску Секки – 6 м. В зал. Турка температурная стратификация отсутствовала, температура воды на поверхности составляла 14 °С, у дна 12,8 °С, прозрачность по диску Секки – 3,2 м.

Из проб планктона прибрежного участка в районе пос. Турка с помощью пиросеквенирования получено 1 906 последовательностей гена 16S рРНК, принадлежащих домену Bacteria. Большинство последовательностей отнесены к филам Cyanobacteria, Proteobacteria, Actinobacteria, Planctomycetes, Verrucomicrobia, Deinococcus-Thermus, Chloroflexi, Bacteroidetes, Acidobacteria, Firmicutes и Armatimonadetes. Восемь последовательностей принадлежали фантомным филам MATCR, BRC1, TDNP, TM7, AD3, OP11 и TM6. Всего выявлен 191 филотип, видовое богатство (кластерное расстояние 0,03), оценённое с помощью непараметрического критерия Chao1, составляло 370.

Основу сообщества формировали представители Cyanobacteria и Proteobacteria, их доля составляла соответственно 50,4 % и 42,1 % от общего числа последовательностей (рис. 1).

Фила Cyanobacteria представлена порядками Chroococcales и Nostocales. При этом доминировали пикопланктонные *Synechococcus* sp. (729 последовательностей), *Cyanobium* sp. (119 последовательностей) и *Cyanobacterium* sp. (26 последовательностей). Среди нанопланктонных видов в прибрежном сообществе на основании более чем 97%-ного сходства последовательностей гена 16S рРНК могут быть выделены виды *Anabaena flos-aquae*, *A. lemmermannii*, *A. solitaria*, *Gloeotrichia echinulata*, *Microcystis* sp., *M. aeruginosa*, *Chamaesiphon* sp., *Phormidium* sp., *Tolypothrix* sp. В филе Proteobacteria доминировали представители класса Alphaproteobacteria из семейств Rhodobacteraceae (329 последовательностей) и Beijerinckiaceae (282 последовательности).

Из проб планктона пелагиали Среднего Байкала было получено 2030 последовательностей 16S рРНК, принадлежащих домену Bacteria. Сообщество состояло в основном из представителей фил Cyanobacteria, Proteobacteria, Actinobacteria, Verrucomicrobia и Planctomycetes. Минорными филами, представленными единичными последовательностями, являлись Bacteroidetes, Thermobaculum, Armatimonadetes, Acidobacteria, TM7 и GN02. Цианобактерии составляли более 75 % сообщества, Proteobacteria и Actinobacteria – 11 и 10 % соответственно. Показатели видового разнообразия бактериопланктона пелагиали были такими же, как и в литорали, выявлено 198 филотипов, коэффициент Chao1 равен 405. Доминирующим филотипом в сообществе пелагиали был *Synechococcus* sp. (1 346 последовательностей, 66,3 %). В составе филы Cyanobacteria помимо *Synechococcus* sp. обнаружены последовательности, принадлежащие родам *Cyanobium* и *Cyanobacterium*. В отличие от прибрежного района последовательности нанопланктонных представителей порядка Nostocales не обнаружены. В филе Actinobacteria доминирующим был неидентифицированный генотип рода *Ilumatobacter* (138 последовательностей). Среди Proteobacteria доминировал *Limnohabitans* sp. (33 последовательности).

Маркерный ген *msuE* был обнаружен в пробах, отобранных в литорали у пос. Турка, в то время как на глубоководной станции разреза м. Ухан – м. Тонкий он не выявлен. За весь период мониторинга планктона оз. Байкал на наличие генов синтеза микроцистинов (2005–2010 гг.) положительный результат получен впервые.

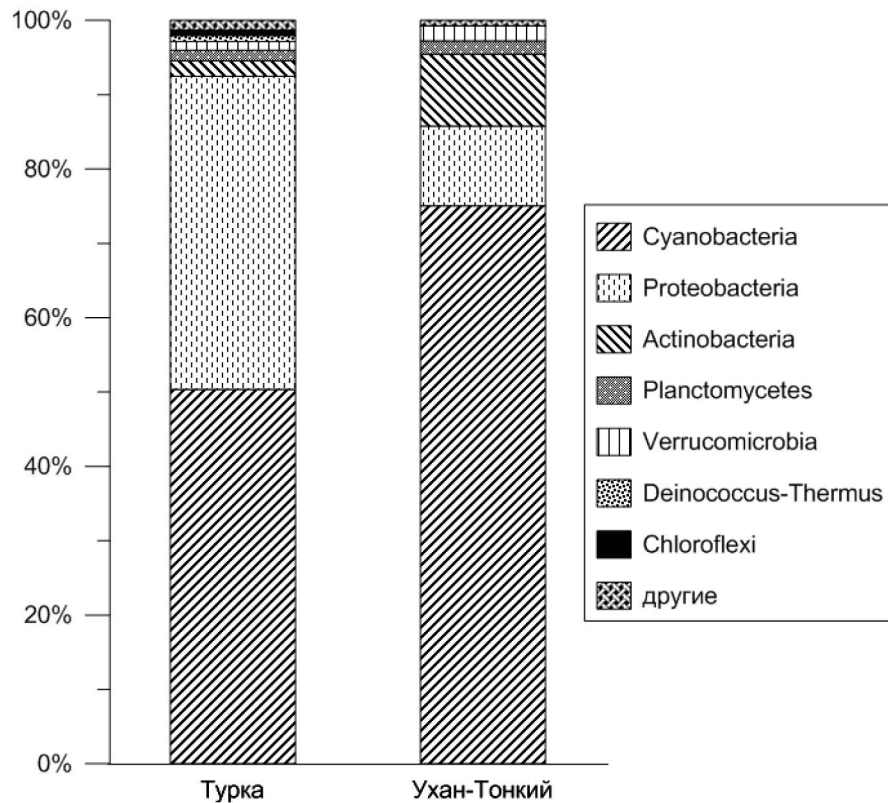


Рис. 1. Результаты метагеномного анализа бактериальных сообществ планктона из прибрежной зоны пос. Турка и станции разреза м. Ухан – м. Тонкий по данным пиросеквенирования последовательностей фрагмента гена 16S рРНК

Из проб, отобранных в прибрежье пос. Турка, было получено 50 клонов, среди них выявлено 6 различных генотипов: ВаТ 10-1, ВаТ 10-3, ВаТ 10-9, ВаТ 10-12, ВаТ 10-13, ВаТ 10-14. Генотипы ВаТ 10-3, ВаТ 10-9, ВаТ 10-12 были на 99 % сходны с последовательностями рода *Microcystis*, тогда как генотипы ВаТ 10-1, ВаТ 10-13 и ВаТ 10-14 – на 99 % сходны с последовательностями рода *Anabaena*.

Ранее было показано, что генетический маркер *mscE* имеет хорошее разрешение на уровне рода. Так, роды *Microcystis*, *Anabaena*, *Nodularia*, *Planktothrix* и *Phormidium* формируют отдельные устойчивые кластеры [19; 24]. Внутри кластера *Microcystis* генотипы ВаТ 10-3 и ВаТ 10-9 группируются вместе с последовательностью *M. wesenbergii* NIES-107 из оз. Кавагучи, Япония (статистическая поддержка 94 %). Последовательность ВаТ 10-12 кластеризуется на древе вместе с последовательностью *Microcystis* sp. B5-4 из Балтийского моря.

В кластере *Anabaena* последовательность ВаТ 10-1 группируется с последовательностью

K1 из оз. Котокельское и штаммами *Anabaena* из скандинавских озёр и Балтийского моря. Последовательности ВаТ 10-13 и 10-14 располагаются на отдельных филогенетических ветвях (рис. 2).

Концентрация микроцистинов, измеренная с помощью ИФА, составила в литорали оз. Байкал в районе пос. Турка 0,17 мкг/л ($\pm 0,01$). Концентрации цианотоксинов на глубоководной станции разреза м. Ухан – м. Тонкий была ниже порога чувствительности метода ИФА.

Обсуждение

В ходе исследования изучены два различных по морфометрии, гидрохимическому и гидрофизическому режиму участка оз. Байкал: глубоководный пелагический и прибрежный, в котором большое влияние оказывает р. Турка – четвёртый по водности приток Байкала [4]. В устье реки отмечаются более высокие показатели концентрации биогенов, численности и биомассы фитопланктона, чем в пелагиали [9].

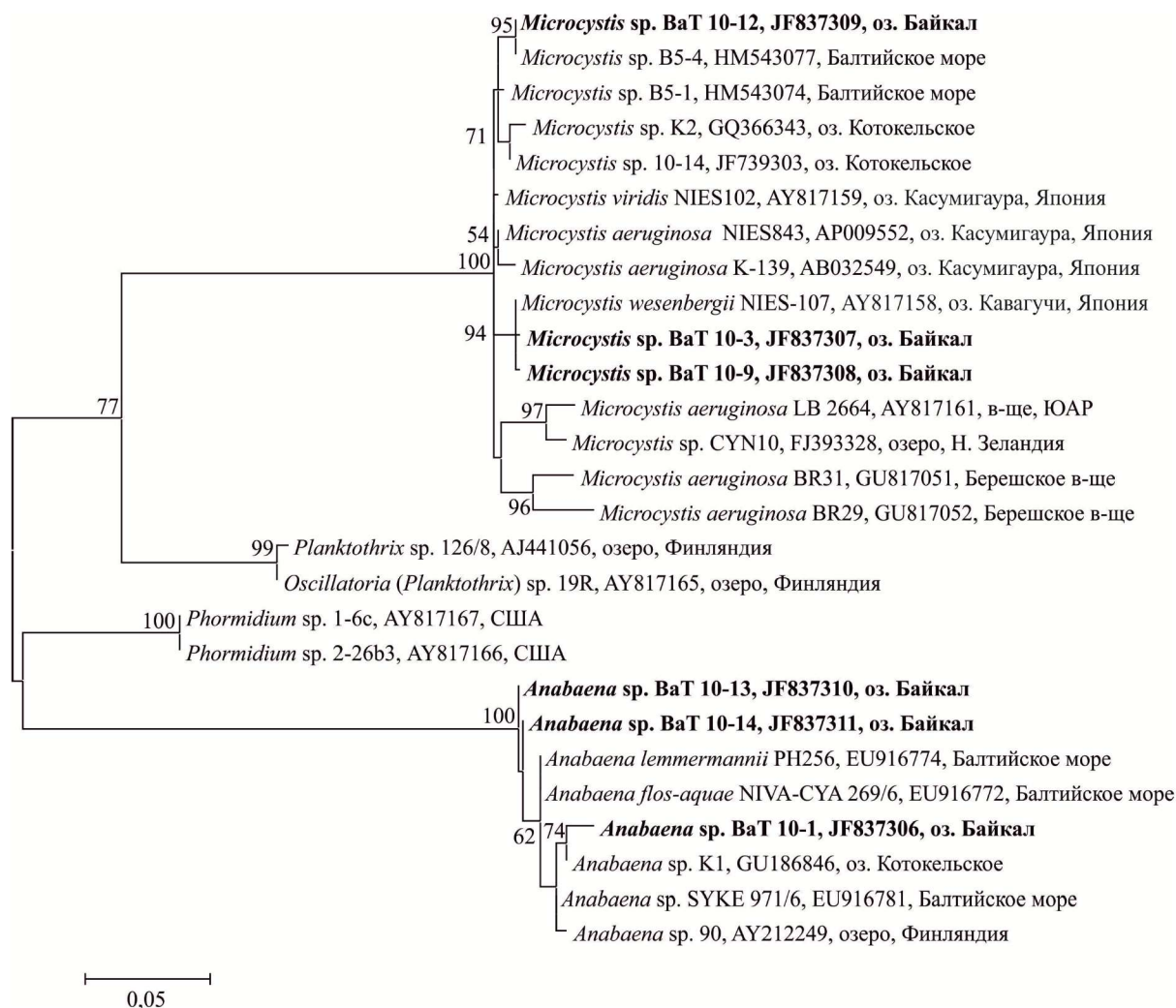


Рис. 2. Филогенетическое древо цианобактерий, основанное на результатах анализа последовательностей фрагментов *tcyE*-генов и построенное методом максимального правдоподобия (ML). Цифрами в узлах ветвления обозначены результаты бутстреп-анализа 1000 реплик. Последовательности *tcyE*-гена из оз. Байкал выделены жирным шрифтом

В районе пос. Турка в 2010 г. начато интенсивное строительство туристических объектов, порта и других сооружений в рамках развития особой экономической зоны туристско-рекреационного типа «Байкальская гавань», которая станет одним из ключевых центров водного туризма и первым современным портом на восточном побережье оз. Байкал.

В данной работе для выявления доминирующих генотипов цианобактерий и поиска потенциально токсичных видов было применено 454 пиросеквенирование – самый современный метод оценки состава микробных сообществ. Согласно нашим данным, в августе в оз. Байкал как в литорали, так и в пелагиали доминировали представители бактериальных фил Cyanobacteria и Proteobacteria. Ранее было показано, что в Южном Байкале в июне бактериопланктон литорали определяли филы Bacteroidetes,

Actinobacteria и Proteobacteria [6]. Все четыре филы, доминировавшие в различные сезоны в планктоне Байкала, а также фила Verrucomicrobia, являются типичными для большинства пресных водоёмов [31].

В озёрах Эри и Сент-Мэрис из системы североамериканских Великих озёр, планктон которых был также изучен на основе 454 пиросеквенирования, как и в литорали у пос. Турка в составе сообществ во время цветений преобладали цианобактерии (77–88 %), а Proteobacteria были второй по численности доминирующей филы: на долю этих двух фил приходилось более 90 % разнообразия сообщества. До 70 % последовательностей, полученных из этих озёр, принадлежали пикопланктонным видам. Основной продуцент цианотоксинов *Microcystis* spp. составлял менее 3 % от общей популяции бактерий [12]. В оз. Байкал вклад последова-

гельностей пикоцианобактерий в прибрежье у пос. Турка составлял более 90 %, на долю *Microcystis* и *Anabaena* приходилось 2,9 %; на станции же разреза м. Ухан – м. Тонкий 100 % генотипов были представлены пикопланктовыми нетоксичными видами. Известно, что представители семейства Rhodobacteraceae, которые доминировали в филе Proteobacteria в литорали, способны разлагать низкомолекулярные токсины, образующиеся при массовом развитии водорослей [29].

Третьей по числу полученных последовательностей в оз. Байкал была фила Actinobacteria. Как известно, Actinobacteria могут составлять до 50 % от общей численности всех бактерий в эпилимнионе [13]. Их обильное развитие в поверхностных слоях воды связывают с наличием в клетках актинородопсина и устойчивостью к УФ-излучению [11].

С помощью маркеров к *mscE*-гену в оз. Байкал обнаружены два МС-продуцирующих рода *Anabaena* и *Microcystis*. Потенциально токсичные представители этих родов, содержащие гены синтеза МС, были найдены в большинстве озёр Финляндии [15]. При этом в среднем 59 % цианобактериальных цветений в Финляндии были гепатотоксичными, а концентрация МС, измеренная с помощью ИФА, варьировала от предельно детектируемой до 5200 мкг/л [15; 26]. В оз. Байкал концентрация МС была невысокой ($0,17 \pm 0,01$ мкг/л) и не превышала порога, установленного для питьевой воды [34]. Известно, что содержание токсина зависит от температуры окружающей среды. По данным K. Sivonen и G. Jones [26], наибольшая концентрация МС достигается при 18 и 25 °С, в то время как при низких (10 °С) температурах синтез токсина замедляется в 2–3 раза. Температура воды у поверхности в прибрежном участке оз. Байкал составляла 14 °С, что близко к порогу низких температур для микроцистин-продуцирующих видов. Другой причиной, препятствующей здесь массовому цветению, является перемешивание водных масс вследствие стока р. Турка.

Несмотря на то что *Microcystis* является наиболее часто выявляемым в токсичных цветениях родом, мы обнаружили одинаковое количество токсичных генотипов родов *Anabaena* и *Microcystis*. Вероятно, это обусловлено тем, что содержащие гетероцисты *Anabaena* spp. способны фиксировать азот и имеют конкурентное преимущество при низких концентрациях биогенов в воде. Ранее показано, что именно в летние месяцы в период лимитирова-

ния биогенных элементов в заливах Байкала наблюдается массовое развитие нанопланктонных азотфиксирующих видов цианобактерий [23].

В оз. Котокельское, расположенном в 2 км от оз. Байкал и связанном с ним реками Турка, Исток и Коточик, ежегодно наблюдаются токсичные цветения цианобактерий, выделены и описаны токсичные генотипы, а также три варианта МС [3; 24]. Летом 2008 г. на оз. Котокельское зарегистрирована массовая гибель рыб, водоплавающих птиц и домашних кошек, отмечено 16 случаев отравлений человека, связанных с употреблением в пищу леща, выловленного в озере. Наличие прямой водной связи между озерами Байкал и Котокельское обуславливает возможность заноса видов с речным стоком. Обнаруженные в литорали у пос. Турка генотипы группы ВаТ 10-1 родственны таковым из оз. Котокельское и на филогенетическом древе группируются вместе. Известно, что одним из факторов, способствующим распространению цианобактериального цветения, является миграция МС-продуцирующих генотипов между водоёмами, которая происходит как вследствие интродукции в озеро токсичных видов из расположенных поблизости мелких озёр и луж во время штормов, либо посредством внешних факторов (перемещение рыбацких лодок, оборудования и т. п.). Подобный факт был описан для Великих озёр (оз. Онтарио) [18].

Токсичные цветения цианобактерий стали обычным явлением в большинстве озёр Европы [21; 28; 33]. Относительно недавно высокие концентрации цианотоксинов были обнаружены в олиготрофных высокогорных озёрах [22] и олигомезотрофных водоёмах [16]. Развитие токсичных цветений связывают с эвтрофированием и глобальным потеплением [25]. Многолетние исследования показали, что на Байкале также происходят изменения климата. Так, начиная с 1896 г. средняя годовая температура возрастала со средней скоростью 1,2 °С в 100 лет [5]. За последние 60 лет постепенно возрастает температура поверхности и верхних слоёв воды в тёплое время года [27]. В связи с развитием туристической индустрии на оз. Байкал усиливается антропогенная нагрузка, что может привести к эвтрофированию мелководных заливов. Эти и другие факторы оказывают негативное влияние на экосистему озера и могут стать причиной развития токсичных цветений.

Заключение

Впервые получены данные о наличии токсичных генотипов цианобактерий и присутствии токсинов в оз. Байкал. Учитывая все имеющиеся предпосылки развития токсичных цветений в мелководных участках озера, которые являются зонами туризма и рекреации, необходимо продолжать мониторинг с целью своевременного выявления очагов потенциальной опасности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 09-04-90420 Укр_ф а, 10-04-01613а, 12-04-90012 Бел_а, 12-04-31672 мол а), публикация статьи осуществлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 13-04-06068-з.

Литература

1. Анализ цианобактерий озера Байкал и Усть-Илимского водохранилища на наличие гена синтеза микроцистина / И. В. Тихонова [и др.] // Докл. Акад. наук. – 2006. – Т. 409, № 3. – С. 1–3.
2. Выявление потенциально токсичных цианобактерий в озере Байкал и водохранилищах Иркутской области с помощью полимеразной цепной реакции / И. В. Тихонова [и др.] // Бюл. ВСНЦ СО РАМН. – 2006. – № 2. – С. 202–205.
3. Выявление токсичных *Microcystis* в озере Котокельское (Бурятия) / О. И. Белых [и др.] // Вестн. ТГУ. Биология. – 2010. – Т. 330. – С. 172–175.
4. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. – Л.: Гидрометиздат, 1986. – Т. 1, вып. 14. – 363 с.
5. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии / М. Н. Шимараев [и др.] // Докл. Акад. наук. – 2002. – Т. 383, № 3. – С. 397–400.
6. Парфенова В. В. Сравнительный анализ биоразнообразия бактериальных сообществ планктона и биопленки в озере Байкал / В. В. Парфенова, А. С. Гладких, О. И. Белых // Микробиология. – 2013. – Т. 82, № 1. – С. 94–105.
7. Поповская Г. И. Массовые, эндемичные и индикаторные виды планктонных водорослей озера Байкал / Г. И. Поповская, О. И. Белых. – Иркутск: Иркут. ун-т, 2002. – 65 с.
8. Продуцируемые цианобактериями токсины в период «цветения» воды в Нижнем Суздальском озере (Санкт-Петербург, Россия) / Л. Н. Ворошко [и др.] // Альгология. – 2010. – № 2. – С. 210–223.
9. Характеристика летнего фитопланктона и автотрофного пикопланктона озера Байкал в 2005 г. / О. И. Белых [и др.] // Альгология. – 2007. – Т. 17, № 3. – С. 380–396.
10. A global network for cyanobacterial bloom and toxin risk management / G. A. Codd [et al.] // International Hydrological Programme. Initial situation assessment and recommendations. UNESCO. – Paris, 2006. – 138 p.
11. A guide to the natural history of freshwater lake bacteria / R.J. Newton [et al.] // Microbiol. Mol. Biol. Rev. – 2011. – Vol. 75. – P. 14–49.
12. Comparative metagenomics of toxic freshwater cyanobacteria bloom communities on two continents / M. M. Steffen [et al.] // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7, N 8. – e44002. doi:10.1371/journal.pone.0044002.
13. Comparative 16S rRNA analysis of lake bacterioplankton reveals globally distributed phylogenetic clusters including an abundant group of actinobacteria / F. O. Glockner [et al.] // Appl. Environ. Microbiol. – 2000. – Vol. 66, N 11. – P. 5053–5068.
14. Cyanobacterial microcystin-LR is a potent and specific inhibitor of protein phosphatases 1 and 2A from both mammals and higher plants / C. MacKintosh [et al.] // FEBS Letters. – 1990. – Vol. 264. – P. 187–192.
15. Detection of microcystin-producing cyanobacteria in Finnish lakes with genus-specific microcystin synthetase gene E (*mcyE*) PCR and associations with environmental factors / A. Rantala [et al.] // Appl. Environ. Microbiol. – 2006. – Vol. 72, N 9. – P. 6101–6110.
16. Determination of microcystin variants and related peptides present in a water bloom of *Planktothrix (Oscillatoria) rubescens* in a Spanish drinking reservoir by LC/ESI-MS / M. Barco [et al.] // Toxicon. – 2004. – Vol. 44. – P. 881–886.
17. Ecological development and genetic diversity of *Microcystis aeruginosa* from artificial reservoir in Russia / N. A. Gaevsky [et al.] // J. of Microbiology. – 2011. – Vol. 49, N 5. – P. 714–720.
18. Hotta A. M. Molecular characterization of potential microcystin producing cyanobacteria in lake Ontario embayments and nearshore waters / A. M. Hotta, M. F. Satchwell, G. L. Boyer // Appl. and Environ. Microbiol. – 2009. – Vol. 73, N 14. – P. 4570–4578.
19. Jungblut A. D. Molecular identification and evolution of the cyclic peptide hepatotoxins, microcystin and nodularin, synthetase genes in three orders of cyanobacteria / A. D. Jungblut, B. A. Neilan // Arch. Microbiol. – 2006. – Vol. 185, N 2. – P. 107–114.
20. Liver tumor promotion by the cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin-LR / R. Nishiwaki-Matsushima [et al.] // J. Cancer Res. Clin. Oncol. – 1992. – Vol. 118, N 6. – P. 420–424.
21. Occurrence and toxicity of cyanobacterial blooms dominated by *Anabaena lemmermannii* P. Richter and *Aphanizomenon* spp. in boreal lakes in 2003 / L. Lepisto [et al.] // Algal. Stud. – 2005. – Vol. 117. – P. 315–328.
22. Plötzliche Todesfälle von Alprinderm im Kanton Graubünden / H. Naegali [et al.] // Schweizer Archiv für Tierheilkunde. – 1997. – Vol. 139. – P. 201–209.
23. Popovskaya G. I. Ecological monitoring of phytoplankton in Lake Baikal / G. I. Popovskaya // Aquatic ecosystem and health management. – 2000. – Vol. 3. – P. 215–225.

24. Presence and genetic diversity of microcystin-producing cyanobacteria (*Anabaena* and *Microcystis*) in Lake Kotokel (Russia, Lake Baikal region) / O. I. Belykh [et al.] // *Hydrobiologia*. – 2011. – Vol. 671, N 1. – P. 241–252.
25. Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions / A. M. Michalak [et al.] // *PNAS*. – 2013. – Vol. 110, N 16. – P. 6448–6452.
26. Sivonen K. Cyanobacterial toxins / K. Sivonen, G. Jones // *Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management*. Eds. I. Chorus and J. Bartram: E and FN Spon. – London, 1999. – P. 41–111.
27. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia / S. E. Hampton [et al.] // *Glob. Chang. Biol.* – 2008. – Vol. 14, N 8. – P. 1947–1958.
28. Skulberg O. M. Toxins produced by cyanophytes in Norwegian inland waters – health and environment / O. M. Skulberg // *In Chemical Data as a Basis of Geomedical Investigations*. – The Norwegian Academy of Science and Letters, Oslo, 1996. – P. 179–216.
29. Stable isotope probing of an algal bloom to identify uncultivated members of the Rhodobacteraceae associated with low-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbon degradation / T. Gutierrez [et al.] // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2011. – Vol. 77, N 21. – P. 7856–7860.
30. The analysis of oral microbial communities of wild-type and toll-like receptor 2-deficient mice using a 454 GS FLX Titanium pyrosequencer / J. Chun [et al.] // *BMC Microbiology*. – 2010. – Vol. 10. doi: 10.1186/1471-2180-10-101.
31. Typical freshwater bacteria: an analysis of available 16S rRNA gene sequences from plankton of lakes and rivers / G. Zwart [et al.] // *Aquatic Microbial Ecology*. – 2002. – Vol. 28, N 2. – P. 141–155.
32. Welker M. Cyanobacterial peptides – Nature's own combinatorial biosynthesis / M. Welker, H. von Dohren // *FEMS Microbiology Reviews*. – 2006. – Vol. 30, N 4. – P. 530–563.
33. Willen N. Water-blooming and toxin-producing cyanobacteria in Swedish fresh and brackish waters, 1981-1995 / N. Willen, R. Mattsson // *Hydrobiologia*. – 1997. – Vol. 353. – P. 181–192.
34. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality Vol. 1 Third edition. – World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2004. – 45 p.

Toxic cyanobacteria in Lake Baikal

O. I. Belykh, A. S. Gladkykh, E. G. Sorokovikova, I. V. Tikhonova, S. A. Potapov

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk

Abstract. Cyanobacteria *Anabaena* and *Microcystis* containing microcystin synthesis genes were found for the first time in the littoral zone of Lake Baikal near Turka village. Microcystin concentration in water according enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) was $0,17 \pm 0,01$ mg/l. Genetic and taxonomic composition of microbial community in Central Baikal was characterized by using pyrosequencing, 3936 nucleotide sequences of 16S rRNA gene fragment were identified. The phylum Cyanobacteria was dominant in the summer bacterioplankton of the littoral and pelagic zones, whereas higher biodiversity was recorded in the littoral plankton.

Keywords: Lake Baikal, cyanobacteria, pyrosequencing, microcystins, gene *mcyE*, ELISA.

Бельх Ольга Ивановна
кандидат биологических наук, ведущий
научный сотрудник, доцент
Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3
тел. (3952) 42-54-15
E-mail: belykh@lin.irk.ru

Belykh Olga Ivanovna
Ph. D. in Biology, Leading Research Scientist,
Associate Professor
Limnological Institute SB RAS
3 Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42-54-15
E-mail: belykh@lin.irk.ru

Гладких Анна Сергеевна
кандидат биологических наук,
научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3
тел. (3952) 42-54-15
E-mail: gladkikh@lin.irk.ru

Gladkykh Anna Sergeevna
Ph. D. in Biology, Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3 Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42-54-15
E-mail: gladkikh@lin.irk.ru

Сороковикова Екатерина Георгиевна
кандидат биологических наук, научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3
тел. (3952) 42-54-15
E-mail: katrin@lin.irk.ru

Тихонова Ирина Васильевна
кандидат биологических наук, научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3
тел. (3952) 42-54-15
E-mail: iren@lin.irk.ru

Потапов Сергей'Анатольевич
аспирант
Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3
тел. (3952) 42-54-15
E-mail: poet1988@list.ru

Sorokovikova Ekaterina Georgievna
Ph. D. in Biology, Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3 Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42-54-15
E-mail: katrin@lin.irk.ru

Tikhonova Irina Vasilyevna
Ph. D. in Biology, Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3 Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42-54-15
E-mail: iren@lin.irk.ru

Potapov Sergey'Anatolyevich
Doctoral Student
Limnological Institute SB RAS
3 Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42-54-15
E-mail: poet1988@list.ru