

УДК 581.95:574.91

О.В. БАБАНАЗАРОВА¹, С.И. СИДЕЛЕВ¹, ДЖ. ФАСТНЕР²

¹Ярославский гос. ун-т им. П.Г. Демидова, кафедра экологии и зоологии,
ул. Матросова, 9, 150057 Ярославль, Россия

²Федеральное агентство окружающей среды, департамент водоподготовки и
защиты ресурсов,

ул. Корренсплатц, 1, 14195 Берлин, Германия

e-mail: baba@bio.uniyar.ac.ru

**ЭКСПАНСИЯ *CYLINDROSPERMOPSIS RACIBORSKII*
(*NOSTOCALES*, *CYANOPROKARYOTA*) В СЕВЕРНЫЕ ШИРОТЫ:
ВСПЫШКА РАЗВИТИЯ В МЕЛКОВОДНОМ
ВЫСОКОЭВТРОФНОМ ОЗ. НЕРО (РОССИЯ)**

Описано появление и массовое развитие пресноводного планктонного вида *Cylindropermopsis raciborskii* (Wołosz.) Seenayya et Subba Raju в северных широтах (57° N) — в высокоэвтрофном оз. Неро (Ярославская обл.). По форме трихомов и размерам гетероцист эта популяция близка к таковым из Индии и Франции. Отсутствие акинет во время массового развития сближает ее с популяциями пантропиков и свидетельствует о высокой экологической и географической пластичности вида. Он способен синтезировать цианотоксины. Следовые количества растворенного цилиндроспермопсина были обнаружены с помощью жидкостной хроматографии/тандемной масс-спектрометрии. Пик обилия (30,5–23,3 % общей численности и биомассы фитопланктона соответственно) в августе 2010 г. был непродолжительным и зафиксирован в середине антициклона с необычно высокой температурой. Подтверждена гипотеза о продвижении вида в северные широты с процессом глобального потепления. Низкие прозрачность, проточность, мелководность, высокая биогенная нагрузка, повышенная минерализация воды оз. Неро относительно других водоемов региона создают благоприятные условия для видов-вселенцев. Существует серьезная угроза появления в водоемах умеренной зоны токсичных популяций водорослей.

Ключевые слова: *Cylindropermopsis raciborskii*, экспансия, озеро Неро, цилиндроспермопсин, инвазия.

Введение

Экспансия в водоемы умеренной зоны пресноводной планктонной *Cyanoprokaryota Cylindropermopsis raciborskii*, изначально описанной как *Anabaena raciborskii* для водоемов субтропической и тропической зон (Wołoszynska, 1912), широко обсуждается учеными многих стран (Chapman, Schelske, 1997; Moore et al., 2003; Briand et al., 2004). Вид отмечался (до 50° N) в водоемах Узбекистана, Казахстана, Туркмении, северной части Каспийского моря, в дельте Волги в Веселовском и Цимлянском водохранилищах (Kogan, 1958; Kutsharova, 1963; Obuchova, Sakchena, 1965; Kozenko, 1964; Andrievskaya, 1969; Ergashev 1969; Ussatshev,

© О.В. Бабаназарова, С.И. Сиделев, Дж. Фастнер, 2014

1938; Kostikova, 1969; Proshkina-Lawrenko, Makarova, 1968; Moroz, 1960; Akseņova, 1965 все авторы цитированы по Padisák, 1997). Его развитие зафиксировано и в водоемах низовья р. Амударьи (Babanazarova, 1997). В 1995 г. наблюдалось массовое развитие вида в водоеме-охладителе Запорожской АЭС (Протасов и др., 2013). Наиболее северные широты встречаемости вида отмечены в водоемах Германии в пределах 53–54° N (Padisák, 2003).

Особый интерес вызывает способность вида продуцировать цианотоксины: цилиндропермопсин (CYN), сакситоксины, анатоксина. CYN относится к группе гепатотоксинов, канцерогенов, он способен к аккумуляции в трофических сетях, опасен для здоровья человека и животных. Впервые CYN был выделен из австралийских популяций *C. raciborskii* (Ohtani et al., 1992). На сегодняшний день установлено, что все штаммы вида из европейских озер не способны синтезировать данный токсин (Fastner et al., 2007). В то же время, гепатотоксический эффект культур вида очевиден (Bernard et al., 2003). Причины этого явления и роль CYN в экспансии *C. raciborskii* в водоемы умеренной зоны до сих пор не выяснены.

Уже в 1997 г. Ю. Падишак (Padisák, 1997), анализируя обширный материал, отмечала высокую адаптивную способность вида к экспансии, его широкую экологическую валентность. Этому способствует целый ряд характеристик вида. Несмотря на предпочтение высоких температур, *C. raciborskii* толерантен и к низким (Briand et al., 2004; Bonilla et al., 2012). Эврифотен, устойчив к условиям высокой перемешиваемости водных масс (Padisák, 1997; Briand et al., 2004). Диазотроф: способен к азотфиксации (есть гетероциты), а также использованию растворенных форм азота, с предпочтением аммония (Saker, Neilan, 2001). Имеет высокое сродство к фосфору и может его запасать больше других *Суанопрокэрыота* (Istvanovics et al., 2000). Способен к вертикальной миграции за счет регулирования количества газовых вакуолей, устойчив к выеданию зоопланктоном (Padisák, 1997). Наиболее дискутируемые гипотезы продвижения в северные широты на фоне глобального потепления: селекция с формированием экоморф (Chonudomkul et al., 2004) и широкая физиологическая толерантность вида в целом (Briand et al., 2004). Массовое образование акинет в подавляющем большинстве популяций умеренной зоны рассматривается как адаптационный механизм переживания зимнего периода (Padisák, 1997, 2003).

Материалы и методы

Озеро Неро расположено в бассейне Верхней Волги (57,06⁰–57,12⁰ N; 39,82⁰–39,30⁰ E). Климат территории умеренно континентальный. Анализ температуры воздуха за 50-летний период на территории Ярославской обл. показал устойчивое ее повышение с 1976 г. на 1,7 °C (Бикбулатов и др., 2003). Озеро Неро самое большое по площади в Ярославской обл. (58 км²), мелководное (средняя глубина 1,6 м, наибольшая – 4,7 м), берега открыты, подвержено сильному ветровому

перемешиванию, имеет около 12 притоков и один исток – р. Вексу, впадающую в р. Которосль (приток р. Волга). Обе реки имеют как питьевое, так и рекреационное значение. Воды озера повышенно минерализованные (от 277 до 1310 мг/л), дно покрыто илом-сапропелем, источником высокой внутренней биогенной нагрузки. Водоем находится на переходной стадии от высокоэвтрофного к гипертрофному состоянию. Более подробно лимнология и гидробиология озера освещена в ряде работ (Babanazarova, Lyashenko, 2007; Состояние ..., 2008; Бабаназарова и др., 2011). Нами проводится многолетний ежемесячный мониторинг экосистемы озера с 1999 г.

Пробы воды для анализа фитопланктона и содержания хл. *a* отбирали из поверхностного слоя на трех станциях в северной части оз. Неро, прилегающих к г. Ростову Великому (Бикбулатов и др., 2003). Одновременно измеряли гидрофизические параметры: прозрачность по диску Секки, температуру и электропроводность воды. Отбор проб и анализ гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических показателей проводили общепринятым методом (Бабаназарова и др., 2011). Для анализа CYN пробы воды фильтровали через фильтры Whatman GF/C, фильтраты использовали для идентификации растворенной формы, фильтры – для определения внутриклеточной концентрации токсина. До анализа фильтры и фильтраты хранились в замороженном виде (-20 °С). При детекции растворенной формы CYN фильтраты подвергались повторному фильтрованию и использовались для определения концентрации. Получение экстракта CYN из клеток микроводорослей включало: цикл замораживания и размораживания фильтра для разрушения клеток, добавление к фильтру 75 % метанола для извлечения токсина с последующей ультразвуковой обработкой, перемешивание пробы на шейкере в течение 1 ч, центрифугирование с получением супернатанта, содержащего CYN, вакуумное центрифугирование супернатанта для удаления метанола, растворение полученного осадка в дистиллированной воде, повторение этапа ультразвуковой обработки раствора. Количество CYN в экстракте и фильтрате идентифицировали, используя метод жидкостной хроматографии/тандемной масс-спектрометрии высокого разрешения (LC-MS/MS) согласно литературным данным (Fastner et al., 2007). В качестве идентификационных признаков для CYN были выбраны: хроматографическое время удержания аналитического стандарта токсина – 4,9 мин, а также протонированный молекулярный ион (M+H⁺) с массой m/z 416,1 и 4 фрагментарных иона с m/z 176, 194, 274 и 336 согласно: (Fastner et al., 2007). Предел обнаружения токсина составлял 0,1 пг на хроматографическую колонку.

В работе использовали эколого-физиологическую классификацию функциональных кодонов водорослей, основанную на близости морфологии, физиологической потребности к свету и биогенным веществам независимо от таксономической принадлежности (Reynolds et al., 2002). Условия обеспеченности светом водорослей в водоеме

характеризовались отношением величины эвфотной зоны к глубине перемешивания, что для мелководных озер приравнивается к отношению прозрачности к глубине. При значениях меньше 0,3 свет является лимитирующим фактором развития фитопланктона (Reynolds, 1984).

Результаты и обсуждение

Абиотические параметры. Лето 2010 г. характеризовалось аномально жарким блокирующим антициклоном, установившимся с последней декады июня до конца второй декады августа. По своей продолжительности и степени последствий жара не имела аналогов за более чем вековую историю наблюдений. Температура воды в июле–августе составляла 26,6–29,1 °С (рис. 1, А). Пролонгирование высоких температур летом 2010 г. явилось основной причиной массового развития *C. raciborskii*. Вид проявил себя не в начале установившейся жары, а спустя месяц, пик обилия был коротким (рис. 1, Б).

Прозрачность воды в августе 2010 г. в период вспышки обилия водоросли резко снизилась до 0,2 м (см. рис. 1, А), другие гидрофизические показатели не выходили за пределы обычных для водоема значений (Бабаназарова и др., 2011). Средние значения некоторых гидрофизических показателей в оз. Неро по трем станциям (№ 3, 5, 8) были такими: глубина (Н, м) $1,2 \pm 0,004$, прозрачность (S, м) $0,2 \pm 0,006$, S/H $0,17 \pm 0,01$, рН $8,25 \pm 0,02$, T, °С $27,2 \pm 0,5$, электропроводность, мкМСМ/см $243 \pm 4,05$.

Степень развития *C. raciborskii* зависит от температуры и уровня освещенности. В умеренной зоне вид развивается только в летнее время при высоких температурах и инсоляции, предпочитая конец вегетационного сезона, период понижения содержания биогенных элементов (Padisák, 1997).

Для прорастания акинет из оз. Балатон необходим диапазон температур 22–23,5 °С (Gorzo, 1987, цит.: по Padisák, 1997). С. Бернард с соавт. (Bernard et al., 2004) рассчитали температурный оптимум прорастания акинет для популяций из разных частей света – 25–35 °С, что несколько превышает диапазон, указанный для Балатонской популяции. Такие температуры у дна в северных широтах могут быть только в мелководных водоемах, что определяет отсутствие вида в глубоких водоемах умеренной зоны (Padisák, 1997). Вид способен выдерживать широкий диапазон температур. Еще в начале 1970-х гг. Г. Кузьмин (1976), отмечая его в списках формирующегося Шекснинском вдхр. (59 °N), пишет о возможно более широком географическом распространении вида, чем считалось ранее. В водоемах низовьев Амударьи вид был наиболее обилен в августе, в период высоких температур, но встречался также в небольших количествах круглогодично, включая подледные пробы (Babanazarova, 1997). Появление *C. raciborskii* в 2009 г. в оз. Неро при обычных температурах для 57° N и вспышка обилия в период аномально высоких значений полностью подтверждают толерантность к широкому диапазону температур. Совпадают и два

других параметра — высокая инсоляция, с конца июня до последней декады августа стояла солнечная погода и некоторое снижение содержания биогенных элементов, наблюдаемое в оз. Неро в конце лета (Бабаназарова и др., 2011).

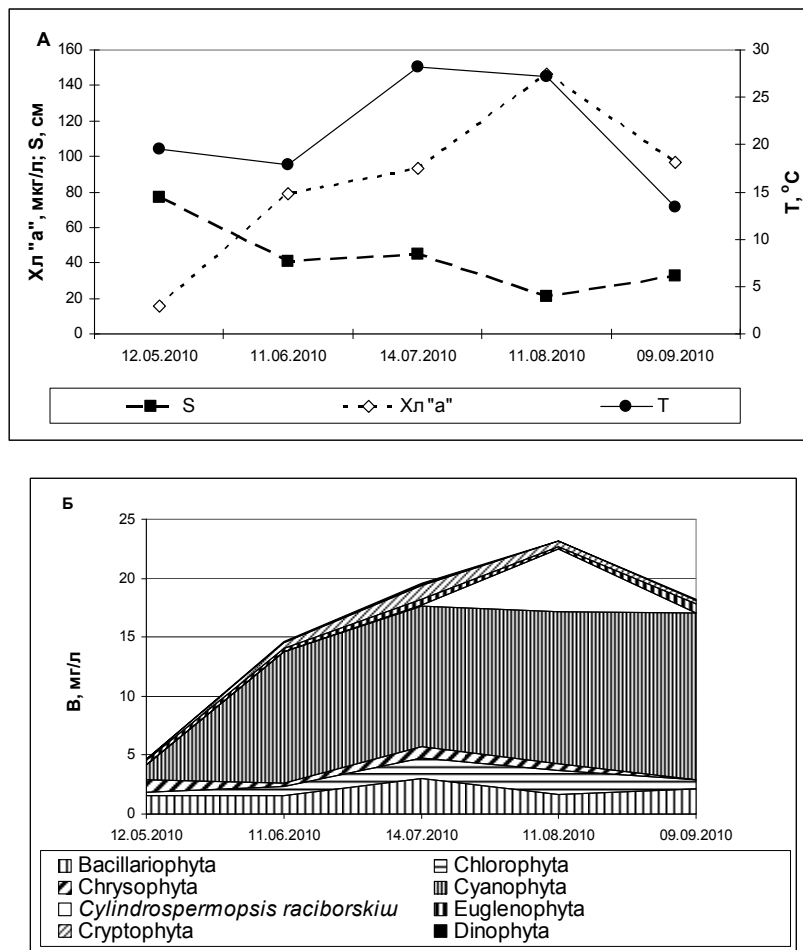


Рис. 1. А — средние показатели (ст. № 3, 5, 8) температуры (T , °C), прозрачности воды по диску Секки (S) и содержания хл. a в сестоне; Б: — динамика биомассы фитопланктона

Морфология. Трихомы *C. raciborskii* в пробах оз. Неро были одиночными, прямыми (рис. 2, А) или в редких случаях в виде открытого кольца (рис. 2, Б). Длина их была небольшая (среднее \pm ошибка среднего: 94 ± 21 ($n = 89$)). Перетяжки между клетками, густо набитыми газовыми вакуолями, были трудно различимы (см. рис. 2, А). Ширина и длина цилиндрических или слабобочковидных клеток варьировали незначительно: $2,2 \pm 0,4$ ($n = 23$) и $5,5 \pm 0,9$ ($n = 27$) соответственно. На одном или на обоих концах трихомов располагались гетероцисты, имеющие коническую каплевидную форму, ширина и длина составляли:

$3,3 \pm 0,1$ ($n = 27$) и $6,6 \pm 0,1$ ($n = 27$) соответственно (рис. 2, А, Б). Акинета была отмечена один раз в сентябре 2009 г. в одном трихоме, размеры не были зафиксированы.

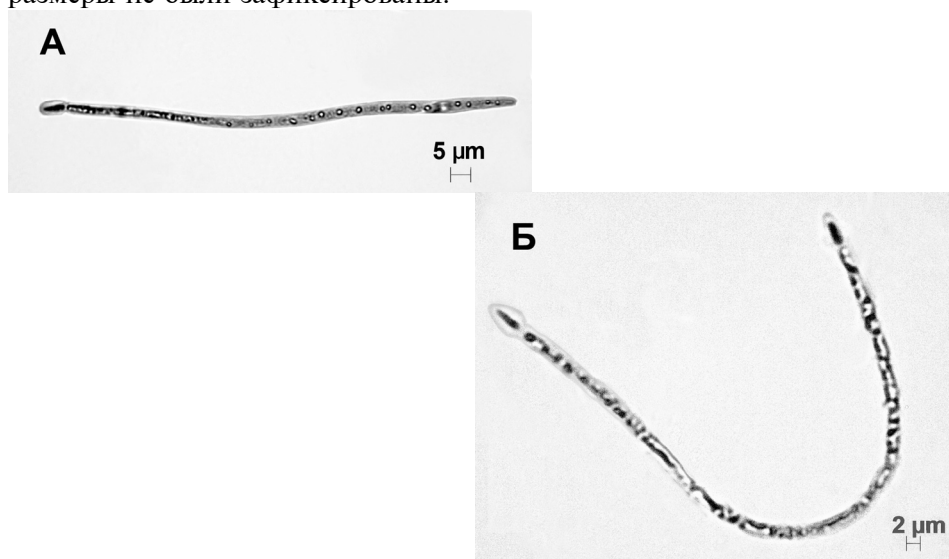


Рис. 2. Микрофотографии *Cylindrospermopsis raciborskii* из оз. Неро

Размеры клеток и трихомов популяции *C. raciborskii* из оз. Неро достаточно вариабельны у популяций из разных мест (см. таблицу). Форма колоний генетически близких клонов может быть в виде прямых трихомов, кольцевидных или спиралевидных, в зависимости от внешних условий (Shafik et al., 2003; Dantas et al., 2010). Короткие, тонкие прямые трихомы преобладали в популяциях из Индии и Франции, близки к нашим показателям были и размеры их гетероцист. Отсутствие акинет при массовом развитии *C. raciborskii* в оз. Неро значительно отличает его морфологические характеристики в ряде наблюдений в водоемах умеренной зоны, где в подавляющем большинстве наблюдается обильное формирование акинет (Padisák, 1997, 2003; Stüken et al., 2006).

В водоемах тропической и субтропической зон вид вегетирует круглогодично и акинеты либо не образует, либо формирует крайне редко. Первоначальным ареалом вида считают глубокие прозрачные водоемы Африки, что определило их способность развиваться при низких концентрациях азота и фосфора и хорошую плавучесть. Вторым эволюционным центром рассматривается Австралия как по географической широте распространения вида, так и экологическим особенностям водоемов — высокой мутности воды за счет неорганических взвесей и/или обильного развития водорослей в озерах, реках континента и пересыхание. Данные характеристики способствовали отбору тенеадаптированных форм и массовому формированию акинет. Наличие акинет способствовало инвазиям вида в водоемы Индии и Центральной Азии, где тенеадаптированность позволяла развиваться в мелководных

эвтрофных водоемах, а затем и в водоемы Европы (Padisák, 1997). Способность формировать акинеты популяциями вида в водоемах умеренной зоны по сравнению с таковыми из озер пантропиков считается одним из аргументов в пользу селективной гипотезы распространения вида (Saker et al., 2003 цит.: по Stüken et al., 2006).

Морфологическая вариабельность *Cylindrospermopsis raciborskii* из разных мест обитания

Страна	Форма трихомов	Длина Ширина трихомов, μm	Длина Ширина гетероцист, μm	Литературные данные
Япония	прямые кольцевидные	= 1,9–6,3	<u>3,3–11,9</u> 1,9–7,0	Chonudomkul et al., 2004
Франция	прямые	<u>10–120</u> 1,5	<u>3–7</u> 1,5–1,8	Briand et al., 2002
США Мона	прямые кольцевидные	<u>51–311</u> 1,7–4,2	<u>5–11,1</u> 1,5–4,6	Hong et al., 2006
Венгрия	прямые	<u>60–250</u> 1,8–4,0	<u>3,4–14</u> 1,8–4,0	Komárek, Horecka, 1979
Индия	прямые	<u>90–150</u> 2,6–3,0	<u>3,4–4,5</u> 1,8–3,0	Singh, 1962
Оз. Неро Россия	прямые	<u>55–130</u> 2–2,3	<u>4–8</u> 2,7–4,1	Наши данные

Существует высокая вероятность, что мы пропустили период активного образования акинет в конце августа с распадом блокирующего антициклона. Массовое развитие акинет при понижении температуры с 25 °С до 15 °С является особенностью популяций умеренной зоны (Stüken et al., 2006). Антициклон распался в начале третьей декады августа. Следующий экспедиционный выезд был примерно через три недели после снижения температуры. Если акинеты были, то быстро опустились на дно и в пробах сентября мы могли наблюдать только единичные трихомы без акинет. В литературе мы нашли одно упоминание для умеренной зоны на отсутствие акинет у *C. raciborskii* – это лотические популяции из Франции (Druart, Briand, 2002). Тем не менее, наблюдаемое массовое развитие вида в оз. Неро без формирования акинет, что характерно для пантропических популяций, свидетельствует о широких адаптивных возможностях *C. raciborskii* и является подтверждением второй гипотезы, основанной на широкой эколого-физиологической валентности вида в целом.

Структура фитопланктона оз. Неро. *Cylindrospermopsis raciborskii* впервые в оз. Неро был найден в сентябре 2009 г. В 2010 г. отдельные трихомы встречались в июле. В августе 2010 г. наблюдался пик обилия вида (численность – 253 млн кл./л, 11,2 млн трихомов/л, биомасса –

5,2 мг/л), что составило 30,5 и 23,3 % соответственно общей численности и биомассы сообщества (см. рис. 1, Б). В сентябре количество данного вида резко снизилось до следовых значений (см. рис. 2, Б). В 2011 г. мы также отмечали единичные нити в июле–сентябре, в 2012 г. вид не был отмечен. Сезонное содержание хлорофилла *a* (хл. *a*) в sestone в 2010 г. было зеркальным относительно прозрачности воды (см. рис. 2, А). Увеличение биомассы фитопланктона в августе 2010 г. произошло в результате развития *C. raciborskii* (см. рис. 2, Б), что свидетельствует о снижении прозрачности воды и увеличении хл. *a* в результате развития вида.

На рис. 1, Б видно, что структура сообщества на уровне крупных таксономических групп с июня по сентябрь мало изменилась. Доминировали, как и во все предыдущие годы наших исследований, синезеленые водоросли (*Pseudanabaena limnetica* (Lemmerm.) Kom., *Limnothrix redekei* (Van Goor) Meffert, *Planktothrix agardhii* Gom.) с варьированием биомассы данной группы от 8,1 до 8,9 мг/л. Этот комплекс видов, согласно функциональной классификации К. Рейнольдса, относится к S_1 кодону. Основными требованиями и условиями его развития является высокое содержание биогенных элементов, низкая прозрачность воды, низкий водообмен, устойчивость к перемешиванию (Reynolds et al., 2002). Вид близок по своим эколого-физиологическим свойствам к данной группе организмов, за исключением меньшей требовательности к содержанию биогенных элементов, и более высокого температурного оптимума, что дало основание отнести его к S_N функциональному кодону (Reynolds et al., 2002; Bernard et al., 2004; Padisák, 2009). Близость кодонов S_1 и S_N , а также правомочность их выделения подтверждают и наблюдения на оз. Неро. *Cylindrospermopsis raciborskii* в 2010 г. буквально внедрился в ценоз на короткий промежуток времени, понизив прозрачность воды вдвое, при этом мало изменилось видовое богатство (61–69 видов в пробе с июня по сентябрь) и индекс Шеннона (1,1–1,29 бит. инф./ед. биомассы). Кратковременная вспышка развития *C. raciborskii* на фоне устойчивого преобладания в водоеме S_1 кодона произошла при пролонгированном повышении температуры, что соответствует литературным данным (Padisák, 1997; Bernard et al., 2003). Пластичность относительно других видов сообщества отмечают и другие исследователи (Kokocinski et al., 2010; Sperfel et al., 2010 цит.: по Bonilla et al., 2012).

Следует отметить появление в фитопланктоне оз. Неро и других теплолюбивых, солоноватоводных водорослей, относящихся к инвазийным видам умеренной зоны: *Aphanizomenon issatschenkoj* (Issatch.) Proschk.-Lavr. и *A. elenkinii* Kissel. В последние годы их встречаемость увеличилась. *Anabaena bergii* f. *minor* (Kissel.) Kossinsk. появилась в летних пробах 2010–2012 гг.

Токсигенность популяций *C. raciborskii* в оз. Неро. Впервые на территории России нам удалось обнаружить присутствие цианотоксина CYN в оз. Неро в период массового развития *C. raciborskii*. Во всех

пробах отмечено наличие растворенного в воде СУН в небольших концентрациях (0,12–0,36 мкг/л), однако обнаружить токсин внутри клеток микроводорослей, в т.ч. *C. raciborskii*, не удалось. Известно, что СУН способен сохраняться в воде длительное время после спада развития видов-продуцентов и лизиса их клеток (Fastner et al., 2007). Возможной причиной отсутствия СУН в биомассе фитопланктона могло быть длительное хранение фильтров (около 2 лет), что могло привести к разрушению клеток водорослей и деградации внутриклеточного токсина. Вопрос о способности синтезировать СУН популяциями *C. raciborskii*, давшими вспышку обилия в оз. Неро в августе 2010 г., остается открытым. Для окончательного заключения необходимо получение альгологически чистой культуры вида с последующим исследованием аналитическими и молекулярно-генетическими методами (Sidelev et al., 2012).

Заключение

Проведенные исследования показали, что по форме прямых и коротких трихомов, форме и размерам гетероцист популяция из оз. Неро близка к таковым Индии и Франции. Отсутствие акинет в период массового развития сближает ее с пантропическими популяциями и подтверждает гипотезу широкой эколого-географической пластичности вида в целом. Пик обилия был коротким и зафиксирован в середине пролонгированного антициклона с необычно высокими летними температурами.

Подтверждены предположения о продвижении вида в северные широты с процессом глобального потепления. Низкая прозрачность и проточность воды, мелководность водоема, высокая биогенная нагрузка и повышенная минерализация воды в оз. Неро относительно других водоемов региона способствуют развитию видов-вселенцев. При высоких летних температурах условия для их вегетации благоприятны, что создает условия для акклиматизации и адаптации к более суровому климату и возможность дальнейшей экспансии, как правило, опасных потенциально токсичных видов. Наличие гепатотоксина – цилиндроспермопсина в фильтрате проб в период массового развития, хотя и не доказывает наличие токсина именно у этого вида, свидетельствует о серьезной угрозе проникновения в водоемы умеренной зоны токсичных популяций водорослей.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-1284.2013.5, проекта Немецко–Российского междисциплинарного научного центра (G–RISC) № С-2012а-10, гранта РФФИ (№ проекта 12-04-31280 мол_а), и проекта Минобрнауки РФ 4.4532.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаназарова О.В., Кармайер Р., Сиделев С.И., Александрина Е.М., Сахарова Е.Г. Структура фитопланктона и содержание микроцистинов в высокоэвтрофном озере Неро // Вод. рес. – 2011. – 38(2). – С. 223–231.
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А. Гидрология и гидрохимия озера Неро. – Рыбинск: Рыбин. Дом печати, 2003. – 190 с.
- Кузьмин Г.В. Водоросли планктона Шекснинского и сопредельной акватории Рыбинского водохранилища // Биология, морфология и систематика водных организмов. – Л.: Наука, 1976. – С. 3–61.
- Протасов А.А., Силаева Л.П., Ярмошенко Л.П., Новоселова Т.Н., Примак А.Б., Савицкий А.Л. Гидробиологические исследования техно-экосистемы Запорожской АЭС // Гидробиол. журн. – 2013. – 49(2). – С. 78–94.
- Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. – М.: Наука, 2008. – 406 с.
- Babanazarova O.V. Phytoplankton structure, composition and production in saline waterbodies in the Lower Amu Dar'ya // Int. J. Salt Lake Res. – 1997. – 6. – P. 217–231.
- Babanazarova O.V., Lyashenko O.A. Inferring long-term changes in the physical-chemical environment of the shallow, enriched lake Nero from statistical and functional analyses of its phytoplankton // J. Plankt. Res. – 2007. – 29(9). – P. 747–756.
- Bernard C., Harvey M., Briand J.F., Bire R., Krys S., Fontaine J.J. Toxicological comparison of diverse *Cylindrospermopsis raciborskii* strains: evidence of liver damage caused by French *C. raciborskii* strain // Environ. Toxicol. – 2003. – 18(3). – P. 176–186.
- Bonilla S., Aubriot L., Soares M.C.S. et al. What drives the distribution of the bloom-forming cyanobacteria *Planktothrix agardhii* and *Cylindrospermopsis raciborskii* ? // Microbiol. Ecol. – 2012. – 79. – P. 594–607.
- Briand J.F., Robillot C., Quiblier-Lloberas C., Hubert J.F., Coute A., Bernard C. Environmental context of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) blooms in a shallow pond in France // Water Res. – 2002. – 36(13). – P. 3183–3192.
- Briand J.-F., Le Boulanger C., Humbert J.-F., Bernard C., Dufour P. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) invasion at mid-latitudes: selection, wide physiological tolerance, or global warming ? // J. Phycol. – 2004. – 40(2). – P. 231–238.
- Chapman A.D., Schelske C.L. Recent appearance of *Cylindrospermopsis* (Cyanobacteria) in five hypereutrophic Florida lakes // J. Phycol. – 1997. – 33. – P. 191–195.
- Chonudomkul D., Yongmanitchai W., Theeragool G. et al. Morphology, genetic diversity, temperature tolerance and toxicity of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanobacteria) strains from Thailand and Japan // FEMS Microbiol. Ecol. – 2004. – 48. – P. 345–355.
- Dantas E.W., Bittencourt-Oliveira M.C., Moura A.N. Spatial-temporal variation in coiled and straight morphotypes of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Wolosz.) Seenayya et Subba Raju (Cyanobacteria) // Acta Bot. Bras. – 2010. – 24(2). – P. 585–591.
- Druart J.C., Briand J.F. First record of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju (Cyanobacteria) in a lotic system in France // Ann. Limnol. – 2002. – 38(4). – P. 339–342.

- Fastner J., Rücker J., Stüken A. et al. Occurrence of the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin in Northeast Germany // Environ. Toxicol. – 2007. – **22**. – P. 26–32.
- Hong Y., Steinman A., Biddanda B., Rediske R., Fahnenstiel G. Occurrence of the toxin-producing cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* in Mona and Muskegon Lakes, Michigan // J. Great Lakes Res. – 2006. – **32**. – P. 645–652.
- Istvanovics V., Shafik H.M., Presing M., Juhos S. Growth and phosphate uptake kinetics of the cyanobacterium, *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanophyceae) in throughflow cultures // Fresh. Biol. – 2000. – **43**(2). – P. 257–275.
- Komárek J., Horecka M. Taxonomic position of three planktonic blue-green algae from the genera *Aphanizomenon* and *Cylindrospermopsis* // Preslia Praha. – 1979. – **51**. – P. 289–312.
- Moore D., O'Donohue M., Shaw G., Critchley C. Potential triggers for akinete differentiation in an Australian strain of the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* (AWT 205/1) // Hydrobiologia. – 2003. – **506-509**. – P. 175–180.
- Ohtani I., Moore R.E., Runnegar M.T.C. Cylindrospermopsin: a potent hepatotoxin from the blue-green alga *Cylindrospermopsis raciborskii* // J. Amer. Chem. Soc. – 1992. – **114**. – P. 7941–7942.
- Padisák J. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju, an expanding, highly adaptive cyanobacterium: worldwide distribution and review of its ecology // Arch. Hydrobiol. (Suppl.) – 1997. – **107**. – P. 563–593.
- Padisák J. Estimation of minimum sedimentary inoculum (akinete) pool of *Cylindrospermopsis raciborskii*: a morphology and life-cycle based method // Hydrobiologia. – 2003. – **502**. – P. 389–394.
- Padisák J., Crosesetti L.O., Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates // Ibid. – 2009. – **621**. – P. 1–19.
- Reynolds C.S. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability // Freshwat. Biol. – 1984. – **14**. – P. 111–142.
- Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton // J. Plankt. Res. – 2002. – **24**(5). – P. 417–428.
- Saker M.L., Neilan B.A. Varied diazotrophies, morphologies, and toxicities of genetically similar isolates of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanophyceae) from Northern Australia // Appl. and Environ. Microbiol. – 2001. – **67**(4). – P. 1839–1845.
- Shafik H.M., Voros L., Sprober P., Presing M., Kovacs A.W. Some special morphological features of *Cylindrospermopsis raciborskii* in batch and continuous cultures // Hydrobiologia. – 2003. – **506-509**. – P. 163–167.
- Sidelev S.I., Fastner J., Dittmann-Thünemann E., Babanazarova O.V., Zubishina A.A. First report on the presence of cylindrospermopsin-producing blue-green algae (Cyanobacteria) in the Russian waters // Mat. II(X) Int. bot. conf. of young sci. in St.-Petersburg (Saint-Petersburg, 11–16 Nov. 2012). – St.Pb., 2012. – P. 40.
- Singh R.N. Seasonal variants of *Anabaenopsis raciborskii* Wolosz. // Hydrobiologia. – 1962. – **20**. – P. 87–91.

- Stüken A., Rücker J., Endrulat T., Preussel K., Hemm M., Nixdorf B., Karsten U., Wiedner C.
Distribution of three alien cyanobacterial species (*Nostocales*) in northeast Germany:
Cylindrospermopsis raciborskii, *Anabaena bergii* and *Aphanizomenon aphanizomenoides* //
Phycologia. – 2006. – 45(6). – P. 696–703.
- Woloszynska J. Das Phytoplankton einiger Javanian Seen mit berücksichtigung des Sawa-
Planktons // Bull. Int. Acad. Sci. Cracov. Ser. B. – 1912. – (6). – P. 649–709.

Поступила 25 сентября 2013 г.

Подписала в печать О.Н. Виноградова

O.V. Babanazarova¹, S.I. Sidelev¹, J. Fastner²

¹P.G. Demidov Yaroslavl State University,
Prosp. Matrosova, 9, 150057 Yaroslavl, Russia

²Federal Environ. Agency, Sect. II, Water treatment and resource protect.,
1, Corrensplatz, 14195 Berlin, Germany

NORTHERN EXPANSION OF *CYLINDROSPERMOPSIS RACIBORSKII*
(*NOSTOCALES*, *CYANOPROKARYOTA*) OBSERVED IN SHALLOW HIGHLY
EUTROPHIC LAKE NERO (RUSSIA)

The emergence and mass development of fresh-water planktonic *Cylindrospermopsis raciborskii* (Wolosz) Seenayya et Subba Raju in northern latitudes (57° N) in the high trophic Lake Nero (The Yaroslavl Region, Russia) were described. This population is close to that of India and France by forms of trichom and the sizes of a heterocyst. The absence of akinetes during mass development makes it similar to populations of pantropics and shows high ecological and geographical plasticity. It is able to produce cyanotoxins. Trace quantities of dissolved cylindrospermopsin were detected using liquid chromatography/tandem mass spectrometry. The abundance peak (30.5–23.3% of a total number and biomass of phytoplankton respectively) was short and occurred during a blocking anticyclone in August 2010. The hypothesis of advancing this species to the northern part of the geosphere according to the process of global warming is confirmed. Low transparency, water level, high biogenic load, mineralization, water resistant time and trophic level produce favourable conditions for invasion species. There is a serious threat for emerging toxic populations of algae in reservoirs of a moderate zone.

Key words: *Cylindrospermopsis raciborskii*, expansion, Lake Nero, cylindrospermopsin, invasion.