

УДК 574.5

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ РОДА *RAPHIDIOPSIS* FRITSCH & RICH
В ВОДОЕМАХ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2025 М.Ю. Горбунов, М.В. Уманская

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия

Статья поступила в редакцию 14.10.2025

По данным метабаркодинга участка V4 гена 16S рРНК обнаружено широкое распространение р. *Raphidiopsis* на нижних участках Куйбышевского водохранилища, в озерах его бассейна, и других озерах Самарской области. В одном из озер *Raphidiopsis raciborskii* был доминантом цианобактериального цветения в позднелетний-раннеосенний период. В большинстве озер с цветением *Planktothrix agardhii* (43 % проб), *Raphidiopsis* входил в состав субдоминантов, и еще в 40 % проб являлся минорным видом. Вклад рода *Raphidiopsis*, в т.ч. *R. raciborskii*, в состав фитопланктонных сообществ ряда озер значительно увеличился по сравнению с концом 20 века и началом 21 века. Это, очевидно, свидетельствует об изменении их лимнологических условий, происходящих в настоящее время. Обнаруженные в регионе клоны *Raphidiopsis* идентичны многим штаммам *R. raciborskii* и *R. mediterranea* из водоемов Европы и Китая. Хотя большинство клонов, идентичных обнаруженным последовательностям *Raphidiopsis*, считается нетоксигенными, токсигенность присутствующих в регионе клонов остается под вопросом из-за малой разрешающей способности гипервариабельного V4-участка рРНК.

Ключевые слова: метабаркодинг, цианобактериальное цветение, *Raphidiopsis raciborskii*, Куйбышевское водохранилище, озера Лесостепного Поволжья

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-303-309

EDN: PZHXAM

Работа выполнена при поддержке Государственного задания Института экологии Волжского бассейна филиала СамНЦ РАН (тема № 1024032600218-3-1.6.20 «Влияние изменений природно-климатических условий на состояние биоразнообразия и функционирование природных и антропогенно-измененных экосистем») и Российского научного фонда (проект № 23-14-20005).

ВВЕДЕНИЕ

Фитопланктон играет ключевую роль в водных экосистемах, обеспечивая основу пищевой цепи и участвуя в глобальном цикле углерода. Состав и структура фитопланктонных сообществ не является постоянной и неизменной; ее изменения, и в особенности смена доминирующих видов связана с изменением условий среды в водоемах и/или появлением ранее отсутствовавших видов [1]. Поэтому постоянный мониторинг и регистрация изменений структуры фитопланктона помогает выявлять экологические нарушения, прогнозировать последствия загрязнения водных ресурсов, и таким образом, является одной из актуальных задач современной водной экологии. Особое внимание в континентальных пресных водоемах должны привлекать изменения в составе сообществ цианобактерий, многие виды которых, массово размножаясь в теплое время года, способны вызывать опасные «цветения воды» [2]. Многие из цианобактерий – возбудителей «цветения» известны одновременно как потенциальные продуценты опасных для человека и животных цианотоксинов [3].

В данной работе мы представляем первые данные о распространении цианобактерий рода *Raphidiopsis* Fritsch & Rich 1929, в том числе *Raphidiopsis raciborskii* (Wołoszyńska) Aguilera et al. 2018, в водоемах бассейна Средней Волги, в первую очередь, на территории Самарской области, по результатам метабаркодирования гипервариабельного участка V4 гена малой субъединицы (16S) rRNA.

Горбунов Михаил Юрьевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии. E-mail: muigor1960@gmail.com

Уманская Марина Викторовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии. E-mail: mvumansk67@gmail.com

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2023-2024 гг. мы провели исследование филогенетического состава прокариотического планктона Куйбышевского и Саратовского водохранилищ и ряда малых водоемов (34 водоема, включая 3 речные пробы), расположенных в их бассейнах. Около 20 малых водоемов Самарской области были обследованы впервые. Выделение ДНК, приготовление библиотек и высокопроизводительное секвенирование выполнено в ООО «Синтол» (Москва). Особенности отбора проб планктона, подготовки проб для секвенирования и биоинформатической обработки его результатов описаны в работе [4]. Из полученных библиотек последовательностей участка V4 гена 16S рРНК были отобраны последовательности, которые, согласно классификатору SINA [5] принадлежат к классу Cyanobacteria.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Во всей полученной библиотеке была обнаружена единственная (при 97% уровне сходства) операционная таксономическая единица (ОТЕ), принадлежащая р. *Raphidiopsis* – ОТЕ12. Последовательности, принадлежащие к этой ОТЕ, встречаются в значительной доле исследованных планктонных проб (табл.1), особенно в малых озерах, в трети из которых их доля превышала 1% всех цианобактерий. В одном из озер, оз. Прудовиков в системе Васильевских озер г. Тольятти, в конце лета наблюдалось доминирование ОТЕ12 среди всех цианобактерий. В озерах с доминированием *Planktothrix agardhii* (13 озер, 24 пробы) ОТЕ12 входила в состав субдоминантного комплекса, и ее доля среди всех последовательностей цианобактерий могла достигать 12,9%, составляя в среднем 1,8%. В остальных озерах (8 озер), в которых была обнаружена ОТЕ12, она как правило была минорным видом (в среднем 0,5% последовательностей всех цианобактерий).

Таблица 1. Встречаемость и средняя доля последовательностей р. *Raphidiopsis* среди всех цианобактерий в различных группах исследованных водоемов

Показатели	Лесные озера Среднего Поволжья	Озера Самарской обл.	Куйбышевское водохранилище	В целом
Число проб (N)	4	56	40	100
Средняя доля	0,05%	5,60%	0,09%	3,17%
Встречаемость	50,0%	82,1%	45,0%	66,0%
Встречаемость с долей >1%	0%	35,7%	2,5%	21,0%

Микроскопическими наблюдениями было подтверждено цветение *R. raciborskii* в озере Прудовиков, и его присутствие еще в трех озерах, Восьмерка, Широкое и Шелехметское. По микроскопическим данным, преобладающая часть трихомов *Raphidiopsis* имела гетероцисты только на одном из концов; при этом акинеты практически не наблюдались (рис. 1). Изредка встречались трихомы с незрелыми гетероцистами, несколько напоминающие *R. mediterranea*. Это, вероятно, связано с активным размножением *R. raciborskii* в моменты отбора проб.

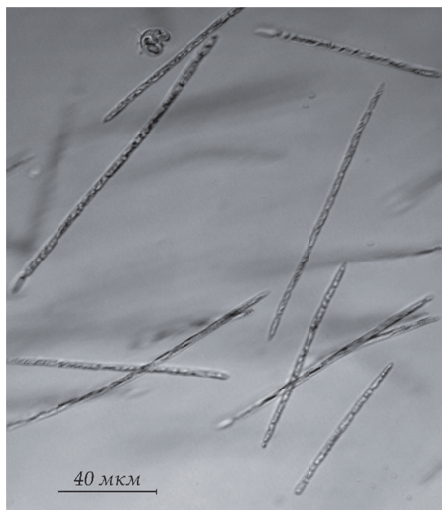


Рис. 1. Микрофотография трихомов *R. raciborskii* в оз. Прудовиков в августе 2023 г.

В Куйбышевском водохранилище последовательности *Raphidiopsis* встречались почти в половине проб, но в очень небольших количествах (табл. 1). Лишь в одной пробе из верхней части Усинского залива, при очень низкой суммарной численности последовательностей цианобактерий, его доля среди них составила около 2,7%. В Саратовском водохранилище *Raphidiopsis* был обнаружен только на одной станции из шести исследованных (напротив устья р. Чагра), причем его доля среди цианобактерий была низкой, 0,15%. На территории лесной зоны Среднего Поволжья (респ. Марий-Эл и Татарстан) последовательности р. *Raphidiopsis* были обнаружены в двух темноводных озерах, но их доля также была очень малой, не превышая 0,2% (табл. 1).

В оз. Прудовиков нами была проанализирована сезонная динамика *R. raciborskii* (рис. 2). Его относительная численность среди всех цианобактерий увеличивалась уже в конце июня (23,8%). До конца сентября наблюдалось практически мономинирование этой ОТЕ (около 90% численности всех цианобактерий), и только в начале октября ее доля снижалась до 54%. Таким образом, в оз. Прудовиков было обнаружено не просто высокое развитие *R. raciborskii*, но и его довольно продолжительное «цветение» (рис. 2).

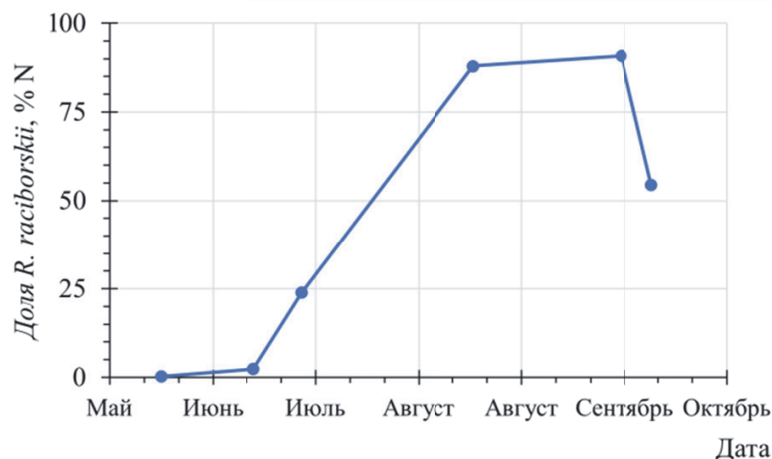


Рис. 2. Сезонная динамика доли (%) *R. raciborskii* от суммарной численности всех ОТЕ цианобактерий (N) в оз. Прудовиков

В состав ОТЕ12 вошли только два варианта уникальных последовательностей (ASV, amplicon sequence variants), отличающихся друг от друга двумя нуклеотидными заменами (сходство 99,2%). Обнаруженные ASV (ASV14 и ASV162) оказались идентичными различным штаммам *R. raciborskii* и других видов рода. Последовательность ASV14 была идентична более 200 штаммов, относящихся в базе данных Genbank к р. *Cylindrospermopsis*, в основном *C. raciborskii*, а также южноамериканским штаммам *R. brookii* и *R. mediterranea*. Последовательность ASV162 совпадает с участками гена 16S большинства секвенированных штаммов *R. curvata* и *R.(C.) curvispora*, а также ряда штаммов *C. raciborskii* из водоемов Китая и Южной Кореи. Первый из них, ASV14, преобладал в оз. Прудовиков (99,5% от суммарной численности ASV14 и ASV162), Сусканском пруду (>96%) и оз. Б. Островное (70%), а также в пробах из Куйбышевского водохранилища (80,9%), а второй в озерах Восьмерка (74%), Широкое (93,8%) и Шелехметское (82,5%).

ОБСУЖДЕНИЕ

Род *Raphidiopsis* в его нынешнем объеме объединяет нитчатые многоклеточные цианобактерии с прямыми, саблевидными, извитыми или спиральными трихомами, без интеркалярных гетероцист, имеющие либо (*Raphidiopsis* s.str.) игловидные конечные вегетативные клетки, либо (формы, ранее объединявшиеся в род *Cylindrospermopsis*) конические или оливовидные терминальные гетероцисты. Типовой вид рода, *Raphidiopsis curvata* Fritsch and Rich 1930, был описан из Северо-Капской области ЮАР. Однако два вида, которые обнаружены в Волжском бассейне по данным многолетнего мониторинга фитопланктона [6], были описаны ранее в составе других родов.

Raphidiopsis raciborskii (Wołoszyńska) Aguilera & al. 2018 (синонимы: *Anabaena raciborskii* Wołoszyńska 1912, *Anabaenopsis raciborskii*, *Cylindrospermopsis raciborskii* (Wołoszyńska) Seenayya & Subba Raju 1972) был впервые описан в 1912 г. как *Anabaena* (sect. *Anabaenopsis*) *raciborskii* из озер острова Ява (Индонезия). В 1930-е гг. Н. Skuja [7] обнаружил этот вид в оз. Кастория (Греция), где он развивается одновременно с другим видом, описанным как новый вид *Raphidiopsis*, *R. mediterranea* Skuja 1937. Дальнейшая история находок *R. raciborskii* в умеренной зоне приведена в статье [8].

В бассейне Волги, и в частности, в Куйбышевском и Саратовском водохранилищах, это относительно новый вид. Хотя еще в 1970-е гг. *R. raciborskii* был отмечен в Шекснинском водохранилище, одном из самых верхних в Волжском каскаде [8], он был впервые указан для Куйбышевского водохранилища только в книге В.В. Паутовой и Н.И. Номоконовой [9], но не упоминался в вышедших ранее сводках фитопланктона Куйбышевского [10] и Саратовского [11] водохранилищ, и, таким образом, вероятно, был впервые зарегистрирован в Куйбышевском водохранилище только в последнем десятилетии 20 века. В 1991-1992 гг. *R. raciborskii* был в очень небольших количествах отмечен в двух пригородных озерах г. Тольятти, относящихся к бассейну Куйбышевского водохранилища, оз. Б. Васильевское и Прудовиков, а в 2013-2014 гг., кроме того, еще в одном озере этой группы, оз. Восьмерка [12]. В 2006 г. он был обнаружен также в оз. Неро (Ярославская обл.), где доминировал в 2010 г. [13], а в 2017 и 2023 гг., как минорный вид, в оз. Лунское, городском водоеме г. Н. Новгород, [14].

Второй вид, *Raphidiopsis setigera* (Aptekarj 1928) Aguilera & al. 2018 (= *Oscillatoria setigera* Aptekarj) был описан из устья притока Днепра, р. Самары, в окрестностях г. Днепропетровска [15], но уже в определителе пресноводных водорослей СССР [16] указывается и для среднего течения Волги. Морфологически этот вид близок к *Raphidiopsis longsetae* Eberly 1966, выделенному из озера в Швеции, и особенно к *Raphidiopsis brooki* P.J. Hill 1972 из озер Миннесоты (США), но отличается от обоих отсутствием спор (акинет), большей длиной трихомов, чем у *R. longsetae* и их несколько меньшей шириной, чем у *R. brookii*. *R. setigera* регистрировался во всех водохранилищах Волги, кроме Шекснинского, Чебоксарского и Волгоградского [6], а также в озерах заповедника Большая Кокшага и его охранной зоне [17], водоемах НП Самарская Лука [18] и в озерах системы Кабан (г. Казань, Татарстан) [19]. Он, однако, всюду является минорным компонентом фитопланктона.

Как показали наши исследования, последовательности, принадлежащие роду *Raphidiopsis*, широко распространены в озерах Самарской области и часто встречаются в пробах исследованной части Куйбышевского водохранилища. В трети проб из озер доля последовательностей *R. raciborskii* среди всех последовательностей цианобактерий превышала 1%, т.е. он входил в состав субдоминантов, а в оз. Прудовиков в позднелетний-раннеосенний период доминировал, достигая более 90% всех последовательностей цианобактерий. В этом озере, а также в оз. Б. Васильевское и Восьмерка этот вид заметно увеличил свой вклад по сравнению с данными о численности и биомассе *R. raciborskii* в предшествующие периоды исследования [12]. Последовательности этого рода были обнаружены также в оз. Шелехметское, где ранее отмечался *R. setigera* [18]; однако при качественном просмотре в 2023-2024 гг. мы обнаружили в этом озере только трихомы с морфологией *R. raciborskii*.

Вариации последовательностей в пределах рода *Raphidiopsis* очень невелики, причем значительную их долю составляют внутривидовые различия. Поэтому анализ даже полных последовательностей гена 16S рРНК, а тем более его V4-участка не позволяют определить, какому именно виду они принадлежат. Кроме того, только десять из восемнадцати описанных видов представлены в Genbank. В частности, в нем отсутствуют последовательности *R. setigera* и *R. longiseta*, а последовательности *R. brookii* принадлежат клонам единственного штамма (D9), который выделен не из типового местообитания, а из водохранилища Billing (Сау-Пауло, Бразилия) и заметно отличается от видового диагноза. Поэтому присутствие тех или иных видов рода необходимо подтверждать независимыми данными, и в первую очередь, прямыми микроскопическими наблюдениями. При качественном просмотре мы обнаружили трихомы *R. raciborskii* в озерах Прудовиков, Восьмерка, Широкое и Шелехметское. В остальных озерах и на станциях Куйбышевского водохранилища при микроскопическом анализе обнаружить представителей этого рода нам не удалось, возможно, из-за их малых численностей.

Поскольку *R. raciborskii* способен выдерживать затенение и фиксировать молекулярный азот, C.S. Reynolds с соавт. [20] создали для него и *Anabaena minutissima* особую функциональную группу («кодон») S_N , приуроченную к «теплым, мутным перемешиваемым водам». Позже эта группа была дополнена другими видами р. *Raphidiopsis* [21]. Экологически эти виды сходны с тонкотрихотомными видами «планктотрихетного» комплекса: *Planktothrix*, *Planktolyngbya*, *Pseudanabaena*, *Limnotherix* гр. *planktonica*, *Geitlerinema*, *Anagnostidinema* и др. (функциональной группы S1), но, в сравнении с ними, несколько менее адаптированы к затенению, и более толерантны к дефициту биогенных элементов [22]. Не слишком удивительно поэтому развитие *Raphidiopsis* в оз. Неро [13], в котором длительное время преобладают виды «планктотрихетного» комплекса, и распространение этого вида в исследованных нами озерах. В озере Прудовиков этот вид пришел на смену сообществам с полидоминированием видов группы S1, развивавшихся в нем в 2001 и 2013-2014 гг. [23]. В других исследованных нами водоемах Самарской области, где мы обнаружили *Raphidiopsis* в качестве субдоминанта, доминантом является *Planktothrix agardhii*, также входящий в функциональную группу S1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженное нами широкое присутствие *p. Raphidiopsis* на нижних участках Куйбышевского водохранилища и заметное, вплоть до цветения, увеличение вклада *R. raciborskii* в состав фитопланктонных сообществ ряда озер, свидетельствует об изменении их лимнологических условий, происходящих в настоящее время. Согласно полученным нами данным, присутствующие в регионе клоны *Raphidiopsis* идентичны по последовательностям ряду штаммов *R. raciborskii* и *R. mediterranea* из стран Европы и из Китая, большинство из которых считается нетоксигенными ([13]; см., однако, [3, 24] и др.). Малая разрешающая способность гипервариабельного участка V4 pPHK не позволяет делать какие-то утверждения о токсигенности обнаруженных нами клонов *Raphidiopsis*, но ASV-14 идентичен по последовательности также ряду южноамериканских штаммов *Raphidiopsis*, известных как активные продуценты сакситоксина [25]. Исследование потенциальной токсичности этого и других доминирующих видов не входило в планы нашего исследования, но, очевидно, заслуживает тщательного дальнейшего исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reynolds, C.S. Environmental requirements and habitat preferences of phytoplankton: chance and certainty in species selection // *Botanica Marina*. 2012. V. 55. P. 1–17.
2. Huisman J., Codd G.A., Paerl H.W., Ibelings B.W., Verspagen J.M., Visser P.M. Cyanobacterial blooms // *Nature Reviews Microbiology*. 2018. V.16. No.8. P.471–483.
3. Nowruzi B., Porzani S.J. Toxic compounds produced by cyanobacteria belonging to several species of the order Nostocales: A review // *Journal of Applied Toxicology*. 2021. V.41. No.4. P. 510–548.
4. Gorbunov M.Yu., Bykova S.V., Tarasova N.G., Krasnova E.S., Umanskaya M.V. Planktonic pro- and microeukaryotes of the Kuibyshev Reservoir and its bays during the cyanobacterial bloom period // *Water*. 2025. V. 17. No.11. 1602
5. Quast C., Pruesse E., Yilmaz P., Gerken J., Schweer T., Yarza P., Peplies J., Glöckner F.O. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools // *Nucl. Acids Res.* 2013. V.41 (D1). D590–D596.
6. Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги / Под ред. А.И. Копылова. Кострома: Костромской печатный дом. 2015. 284 с.
7. Skuja H. Süßwasseralgen aus Griechenland und Kleinasien // *Hedwigia*. 1937. V. 77. P. 15–73.
8. Корнева Л.Г. Инвазии чужеродных видов планктонных водорослей в пресных водах Голарктики (обзор) // *Российский журнал биологических инвазий*. 2014. Т.7, № 1. С.9–37.
9. Паутова В.Н., Номоконова В.И. Динамика фитопланктона нижней Волги – от реки к каскаду. Тольятти: изд-во Самарского науч. центра РАН, 2001. 279 с.
10. Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища / Под ред. С.М. Коновалова и В.Н. Паутовой. Л.: Наука, 1989. 304 с.
11. Попченко И.И. Видовой состав и динамика фитопланктона Саратовского водохранилища. Тольятти, изд-во Самарского науч. центра РАН, 2001. 148 с.
12. Кривина Е.С. Трансформация фитопланктона малых водоемов урбанизированных территорий в условиях изменения антропогенной нагрузки: дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2018. 186 с.
13. Sidelev S, Koksharova O, Babanazarova O, Fastner J, Chernova E, Gusev E. Phylogeographic, toxicological and ecological evidence for the global distribution of *Raphidiopsis raciborskii* and its northernmost presence in Lake Nero, Central Western Russia // *Harmful Algae*. 2020. V.98. 101889.
14. Старцева Н.А., Гаврилко Д.Е. Первая находка *Raphidiopsis raciborskii* (*Woloszynska*) *Seenyua et Subba Raju* в оз. Лунское (Нижний Новгород, Россия) // *Озера Евразии: Проблемы и пути их решения. Материалы III межд. конф. г. Казань, 20–23 мая 2025 г. Казань: Изд-во АН РТ, 2025. С. 886–891.*
15. Еленкин А.А. Синезеленые водоросли СССР. Специальная (систематическая) часть. Вып. 2. Москва: Ленинград: Изд-во АН СССР, 1949. 926 с.
16. Голлербах М.М., Косинская Е.К., Полянский В.И. Синие-зеленые водоросли // *Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2. М., 1953. 652 с.*
17. Мингазова, Н.М., Палагушкина, О.В., Деревенская, О.Ю., Монасыпов, М.А., Набеева, Э.Г. Гидробиологические исследования водных объектов заповедника «Большая Кокшага» // *Научные труды Государственного природного заповедника «Большая Кокшага»*. 2009. Т. 4. С. 213–246.
18. Горохова О.Г. Таксономический состав альгофлоры планктона водоемов охраняемых территорий самарской области // *Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии*. 2010. Т. 19. № 4. С. 51–71.
19. Фролова Л.Л., Свердруп А.Э., Маланин С.Ю., Деревенская О.Ю., Хусаинов А.М., Харченко А.М. Метагеном гидробионтов озер Кабан города Казани. Анализ видового разнообразия гидробионтов по маркерным генам / Под ред. Л.Л. Фроловой. Казань: Издательство Казанского университета, 2019. 218 с.
20. Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton // *Journal of Plankton Research*. 2002. V. 24, No.5. P. 417–428.
21. Padisák J., Crossetti L.O., Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates // *Hydrobiologia*. 2009. V.621. No.1. P.1–19.
22. Aguilera A., Aubriot L., Echenique RO, Donadelli JL, Salerno GL. *Raphidiopsis mediterranea* (Nostocales) exhibits a flexible growth strategy under light and nutrient fluctuations in contrast to *Planktothrix agardhii* (Oscillatoriales). *Hydrobiologia*. 2019. V.839, No.1. P.145–57.

23. Кривина Е.С., Тарасова Н.Г. Особенности вертикального распределения планктонных водорослей в стратифицированном водоеме (на примере оз. Прудовиков г. о. Тольятти). *Вода: химия и экология*, 2017. Вып. 9. С. 55-63.
24. Li R, Carmichael WW, Brittain S, Eaglesham GK, Shaw GR, Liu Y, Watanabe MM. First report of the cyanotoxins cylindrospermopsin and deoxycylindrospermopsin from *Raphidiopsis curvata* (Cyanobacteria). *Journal of Phycology*. 2001. V.37, No.6. P.1121-1126.
25. Hoff-Rissetti, C., Doerr, F.A., Schaker, P.D.C., Pinto, E., Werner, V.R. and Fiore, M.F., 2013. Cylindrospermopsin and saxitoxin synthetase genes in *Cylindrospermopsis raciborskii* strains from Brazilian freshwater. *PLoS One*, V.8, No.8. e74238.

DISTRIBUTION OF CYANOBACTERIA *RAPHIDIOPSIS* FRITSCH & RICH IN WATER BODIES OF THE SAMARA REGION

© 2023 M.Yu. Gorbunov, M.V. Umanskaya

Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, Togliatti, Russia

Metabarcoding of the V4 region of the 16S rRNA gene revealed a widespread presence of the genus *Raphidiopsis* in the lower reaches of the Kuibyshev Reservoir, in the lakes of its basin, and in other lakes of the Samara Region. In one of the lakes, *Raphidiopsis raciborskii* was the dominant species of the cyanobacterial bloom during the late summer-early autumn period. In the majority of lakes with *Planktothrix agardhii* blooms (43% of samples), *Raphidiopsis* was a subdominant species, and in another 40% of samples, it was a minor species. The contribution of the genus *Raphidiopsis*, including *R. raciborskii*, to the phytoplankton communities of a number of lakes has significantly increased compared to the late 20th and early 21st centuries. This clearly indicates a current change in their limnological conditions. The *Raphidiopsis* clones discovered in the region are identical to many strains of *R. raciborskii* and *R. mediterranea* from water bodies in Europe and China. Although most clones identical to the detected *Raphidiopsis* sequences are considered nontoxic, the toxicity of the clones present in the region remains questionable due to the low resolution of the V4 hypervariable region of rRNA.

Keywords: metabarcoding, cyanobacterial bloom, *Raphidiopsis raciborskii*, Kuibyshev Reservoir, lakes of the Forest-Steppe Volga region

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-303-309

EDN: PZHXAM

REFERENCES

1. Reynolds, C.S. Environmental requirements and habitat preferences of phytoplankton: chance and certainty in species selection // *Botanica Marina*. 2012. V. 55. P. 1–17.
2. Huisman J., Codd G.A., Paerl H.W., Ibelings B.W., Verspagen J.M., Visser P.M. Cyano-bacterial blooms // *Nature Reviews Microbiology*. 2018. V.16. No.8. P.471-483.
3. Nowruz B., Porzani S.J. Toxic compounds produced by cyanobacteria belonging to several species of the order Nostocales: A review // *Journal of Applied Toxicology*. 2021. V.41. No.4. P. 510-548.
4. Gorbunov M.Yu., Bykova S.V., Tarasova N.G., Krasnova E.S., Umanskaya M.V. Planktonic pro- and microeukaryotes of the Kuibyshev Reservoir and its bays during the cyanobacterial bloom period // *Water*. 2025. V. 17. No.11. 1602
5. Quast C., Pruesse E., Yilmaz P., Gerken J., Schweer T., Yarza P., Peplies J., Glöckner F.O. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools // *Nucl. Acids Res.* 2013. V.41 (D1). D590-D596.
6. Korneva L.G. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги / Под ред. А.И. Копылова. Кострома: Костромской печатный дом. 2015. 284 с.
7. Skuja H. Süßwasseralgen aus Griechenland und Kleinasien // *Hedwigia*. 1937. V. 77. P. 15-73.
8. Korneva L.G. Инвазии чужеродных видов планктонных водорослей в пресных водах Голарктики (обзор) // *Российский журнал биологических инвазий*. 2014. Т.7, № 1. С.9-37.
9. Павтова В.Н., Номоконова В.И. Динамика фитопланктона нижней Волги – от реки к каскаду. Тольятти: изд-во Самарского науч. центра РАН, 2001. 279 с.
10. Экология фитопланктона Кузбывшевского водохранилища / Под ред. С.М. Конавовой и В.Н. Павтовой. Л.: Наука, 1989. 304 с.
11. Попченко И.И. Видовой состав и динамика фитопланктона Саратовского водохранилища. Тольятти, изд-во Самарского науч. центра РАН, 2001. 148 с.
12. Кривина Е.С. Трансформация фитопланктона малых водоемов urbanizirovannyh territorij v usloviyah izmeneniya antropogennoj nagruzki: дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2018. 186 с.
13. Sidelev S, Koksharova O, Babanazarova O, Fastner J, Chernova E, Gusev E. Phylogeographic, toxicological and ecological evidence for the global distribution of *Raphidiopsis raciborskii* and its northernmost presence in Lake Nero, Central Western Russia // *Harmful Algae*. 2020. V.98. 101889.
14. Starceva N.A., Gavrilko D.E. Первая находка *Raphidiopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenyya et Subba Raju в оз.

- Lunskoe (Nizhnij Novgorod, Rossiya) // Oзера Evrazii: Problemy i puti ih resheniya. Materialy III mezhd.konf. g. Kazan', 20-23 maya 2025 g. Kazan': Izd-vo AN RT, 2025. S. 886-891.
15. Elenkin A.A. Sinezelenye vodorosli SSSR. Special'naya (sistematicheskaya) chast'. Vyp. 2. Moskva: Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1949. 926 s.
 16. Gollerbah M.M., Kosinskaya E.K., Polyanskij V.I. Sine-zelenye vodorosli // Opre-delitel' presnovodnyh vodoroslej SSSR. Vyp. 2. M., 1953. 652 s.
 17. Mingazova, N.M., Palagushkina, O.V., Derevenskaya, O.Yu., Monasypov, M.A., Nabeeva, E.G. Hidrobiologicheskie issledovaniya vodnyh ob»ektov zapovednika «Bol'shaya Kokshaga» //Nauchnye trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Bol'shaya Kokshaga». 2009. T. 4. S. 213-246.
 18. Gorohova O.G. Taksonomicheskij sostav algoflory planktona vodoemov ohranyae-myh territorij samarskoj oblasti //Samarskaya Luka: problemy regional'noj i global'noj ekologii. 2010. T. 19. № 4. S. 51-71.
 19. Frolova L.L., Sverdrup A.E., Malanin S.Yu., Derevenskaya O.Yu., Husainov A.M., Harchenko A.M. Metagenom gidrobiontov ozer Kaban goroda Kazani. Analiz vidovogo raznoobraziya gidrobiontov po markernym genam / Pod red. L.L. Frolovoj. Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta, 2019. 218 s.
 20. Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional clas-sification of the freshwater phytoplankton //Journal of Plankton Research. 2002. V. 24, No.5. P. 417–428.
 21. Padisák J., Crossetti L.O., Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phy-toplankton functional classification: a critical review with updates //Hydrobiologia. 2009. V.621. No.1. P.1-19.
 22. Aguilera A., Aubriot L., Echenique RO, Donadelli JL, Salerno GL. Raphidiopsis mediter-ranea (Nostocales) exhibits a flexible growth strategy under light and nutrient fluctua-tions in contrast to Planktothrix agardhii (Oscillatoriales). Hydrobiologia. 2019. V.839, No.1. P.145-57.
 23. Krivina E.S., Tarasova N.G. Osobennosti vertikal'nogo raspredeleniya plankton-nyh vodoroslej v stratificirovannom vodoeme (na primere oz. Prudovikov g. o. Tol'yatti). Voda: himiya i ekologiya, 2017. Vyp. 9. S.55-63.
 24. Li R, Carmichael WW, Brittain S, Eaglesham GK, Shaw GR, Liu Y, Watanabe MM. First report of the cyanotoxins cylindrospermopsin and deoxycylindrospermopsin from Raphidiopsis curvata (Cyanobacteria). Journal of Phycology. 2001. V.37, No.6. P.1121-1126.
 25. Hoff-Rissetti, C., Doerr, F.A., Schaker, P.D.C., Pinto, E., Werner, V.R. and Fiore, M.F., 2013. Cylindrospermopsin and saxitoxin synthetase genes in Cylindrospermopsis raci-borskii strains from Brzilian freshwater. PLoS One, V.8, No.8. e74238.