

Водная флора и фауна

УДК 574.5

МАССОВОЕ РАЗВИТИЕ ЦИАНОБАКТЕРИИ *GLOEOTRICHIA ECHINULATA* В ОЗЕРЕ ПЛЕЩЕЕВО: ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ

А. Н. Шаров*

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук

152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: *sharov@ibiw.ru

Поступила в редакцию 27.03.2026

В статье представлен обзор публикаций, посвященных экологии и динамике “цветения” цианобактерии *Gloeotrichia echinulata* (J.E. Smith) P. Richter в олиготрофных и мезотрофных озерах. На примере оз. Плещеево обобщены многолетние (за последние 100 лет) данные по составу и продуктивности фитопланктона. Показано, что с 2017 г. в озере ежегодно наблюдаются вспышки вегетации *G. echinulata*, вызывающие интенсивное “цветение” воды. Массовое развитие этого вида обусловлено сочетанием антропогенной эвтрофикации (повышение фосфорной нагрузки за счет стоков с водосбора), климатического потепления и гидрологической изоляции озера. Особое внимание уделено механизму обратной связи: *G. echinulata* не только реагирует на повышение содержания фосфора, но и активно мобилизует его из донных отложений, усиливая эвтрофикацию и создавая условия для собственного доминирования. Обсуждаются экологические последствия: угроза для популяции эндемичной переславской ряпушки (*Coregonus albula*), стимуляция развития сопутствующих токсичных цианобактерий и ухудшение качества воды, что создает риски для водоснабжения г. Переславля-Залесского.

Ключевые слова: глеотрихия, “цветение” воды, фитопланктон, цианотоксины, качество вод.

DOI: 10.47021/0320-3557-2026-114-7-18

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря многочисленным адаптациям, например, более высокому температурному оптимуму по сравнению с другими группами фитопланктона [Paerl, Huisman, 2008], цианобактерии лучше развиваются в меняющемся мире и при таких явлениях, как глобальное потепление, волны жары и эвтрофикация [O'neil et al., 2012; Korneva, Glushenko, 2020]. Размножаясь в больших количествах, цианобактерии создают явления, называемые “цветением” воды, которые влияют на многие аспекты водных экосистем, воздействуя на процессы, протекающие в организмах, обитающих в этих местообитаниях [Havens, 2008; Zaytseva, Medvedeva, 2022]. Особенно уязвимой группой для цветения цианобактерий является зоопланктон, который неразрывно связан с фитопланктоном.

На планктонных животных присутствие цианобактерий может влиять различными способами [Ger et al., 2016]. Считается, что цветение цианобактерий является стрессовым фактором, вызывающим снижение биоразнообразия в водных экосистемах из-за многочисленных ингибирующих воздействий на зоопланктон [Paerl and Otten, 2013], таких как, например, выработка токсинов [Tillmanns et al., 2008] или ухудшение питательной ценности [Wilson et al., 2006]. Большие колонии или длинные трихомы затрудняют питание животных и могут вызывать механические повреждения пищевого аппарата [Wejnerowski et al., 2015].

Одним из видов цианобактерий, способных существенно влиять на озерные экосистемы, является колониальная азотфиксирующая *Gloeotrichia echinulata* (J.E. Smith) P. Richter [Carey et al., 2008]. Довольно большое количество работ показывает, что ее массовое развитие может быть важной силой, структурирующей сообщества [Bruno et al., 2003; Noges et al., 2004; Suikkanen et al., 2005; Halpern et al., 2007; Carey et al., 2017]. *G. echinulata* может усиливать эвтрофикацию, особенно в олиготрофных озерах, где эта цианобактерия недавно начала активно размножаться [Carey, Rengefors, 2010].

Хотя *G. echinulata* исторически наблюдалась в мезоэвтрофных и эвтрофных озерах [Karlsson-Elfgren et al., 2003], в последнее время ее цветение было обнаружено в олиго- и мезотрофных озерах, где ранее не было зафиксировано массовое развитие *G. echinulata* [Carey et al., 2008; Carey et al., 2009]. По крайней мере, в некоторых из этих озер с низким содержанием питательных веществ цветение *G. echinulata* достаточно плотное, чтобы вызвать проблемы в управлении озерами [Carey et al., 2008]. Таким образом, понимание факторов, позволяющих *G. echinulata* доминировать в планктонных сообществах, представляет экологический интерес и важно для управления озерами как в олиготрофных, так и в эвтрофных озерах.

Цель работы — обобщение литературных данных о развитии цианобактерии *Gloeotrichia echinulata* в олиготрофных и мезотрофных

озерах для прогноза изменений экосистемы оз. Плещеево и разработки рекомендаций по ее

сохранению и восстановлению после вселения глеотрихии щетинистой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Плещеево озеро расположено на юго-западе Ярославской области России. Входит в состав национального парка “Плещеево озеро”. Площадь озера — 51.8 км², наибольшая длина 9.5 км, максимальная ширина 6.5 км. Озеро имеет округлую форму, берега ровные, низменные, заболоченные (рис. 1). Максимальная глубина — до 25 м, средняя — 11 м. Объем воды — 0.58 км³, площадь водосборного бассейна —

436 км². Возраст оз. Плещеево около 30 тыс. лет. Оно образовалось после отступления континентальных ледников. Это подтверждается самим положением озера на границе ледниковой морены и древних аллювиальных наносов. Древний водоем был гораздо крупнее нынешнего. Его прежние границы заметны как возвышенная кайма на восточной и южной стороне озера [Экосистема..., 1989 (Ekosistema..., 1989)].



Рис. 1. Космический снимок оз. Плещеево 30 сентября 2024 г. (снимок сделан с использованием Информационной системы “Вега-Гидро” <http://hydro.geosmis.ru/>).

Fig. 1. Satellite image of Lake Pleshcheyevo on September 30, 2024 (the image was taken using the Vega-Hydro Information System <http://hydro.geosmis.ru/>).

Данная работа основана на анализе литературных источников о *G. echinulata* в различных водоемах мира, немногочисленных публикаций по оз. Плещеево и результатах собственных исследований автора в 2020–2026 гг.

Озеро Плещеево — димиктический водоем с весенней и осенней гомотермией, и ярко выраженной температурной стратификацией в летний период [Поддубный и др., 2020 (Poddubniy et al., 2020)]. Крупномасштабные комплексные изучения состояния экосистемы оз. Плещеево были выполнены сотрудниками

ИБВВ РАН в конце 1970-х–начале 1980-х гг. Наряду с всесторонними гидробиологическими и ихтиологическими исследованиями, большое внимание уделялось изучению абиотических факторов среды и, в первую очередь, закономерностям формирования термического режима и структуры течений в озере [Экосистема..., 1989 (Ekosistema..., 1989)].

Следующий этап был связан исследованиями по теме “Комплексное исследование экосистемы оз. Плещеево” 2013–2017 гг. при финансовой поддержке Национального

парка “Плещеево озеро”. На основании опубликованных данных, архивных материалов и результатов оригинальных исследований выявлен ряд изменений, которые произошли в растительном покрове оз. Плещеево с 1899 по 2017 гг. Изучены основные характеристики макробентоса биоценоза *Dreissena polymorpha*. Проанализированы особенности размерно-возрастной и половой структур популяции переславской ряпушки, а также ее плодовитость, темп роста и морфологические признаки двух филогенетических линий ряпушки (Е и ALBP2). Также представлены сведения о фауне паразитов, сезонной динамике основных гематологических показателей, суточном ритме питания переславской ряпушки. Рассматриваются особенности формирования термической стратификации и динамические процессы в оз. Плещеево в вегетационный период.

Исследования 2020-х гг. связаны с анализом и оценкой состояния экосистемы оз. Плещеево как уникального природного объекта, места обитания европейской ряпушки; и разработкой мероприятий по восстановлению популяции Переславской ряпушки; с оценкой

причин и последствий “цветения” воды цианобактерией из рода *Gloeotrichia*.

Озеро Плещеево — источник питьевого водоснабжения г. Переславль-Залесский относится и объект особой охраны национального парка, место обитания переславской ряпушки, которая является эндемиком озера и занесена в Красную книгу РФ. В последние годы состояние экосистемы озера ухудшается. В 2022–2023 гг. по качеству воды оз. Плещеево переходило из категории “слабо загрязненная” в категорию “загрязненная”. В 2024 г. в связи с многоводностью года качество воды вернулось в категорию “слабо загрязненная”. По мнению специалистов национального парка “Плещеево озеро”, одна из причин ухудшения качества воды — активная застройка в последние годы водосборных бассейнов притоков озера. Согласно программе комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры Переславля-Залесского до 2040 г. (утверждена 23.12.2022 №ПОС.03-2869/22), водоотведением обеспечено лишь 57% городского жилищного фонда. Согласно той же программе, городские канализационные коллекторы и сети изношены на 90%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение фитопланктона оз. Плещеево проводилось с 1920–1930-х гг. [Борисов, 1924 (Borisov, 1924); Кастальская-Карзинкина, 1934 (Kastal'skaya-Karzinkina, 1934)]. Более обстоятельные исследования велись Институтом биологии внутренних вод в 1960–80-е гг. [Ильинский, 1970 (Il'inskiy, 1970); Балонов, 1981 (Balonov, 1981); Экосистема..., 1989 (Ekosistema..., 1989)]. С тех пор и до 2014 г. комплексных работ на озере не было. О состоянии фитопланктона водоема имелись лишь отрывочные данные [Костина, 1992 (Kostina, 1992); Ляшенко, 2003 (Lyashenko, 2003); Lyashenko, 2004].

В 2014–2016 гг. биомасса и состав фитопланктона не отличались от таковых в предыдущие годы исследования [Экосистема..., 1989 (Ekosistema..., 1989); Костина, 1992 (Kostina, 1992); Сахарова, 2019 (Sakharova, 2019)] и были свойственны мезотрофным водоемам умеренной зоны [Трифанова, 1990 (Trifanova, 1990)]. При установлении устойчивой температурной стратификации в июле наблюдался пик биомассы фитопланктона за счет динофитовых (*Ceratium hirundinella* (O.F.Müller) Dujardin) и диатомовых (*Asterionella formosa* Hassall, *Fragilaria crotonensis* Kitton) водорослей. Цианопрокариоты (*Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Dolichospermum* spp.) доминировали в поверхностном слое воды.

При этом биомасса фитопланктона в июле в отдельные годы могла достигать 70 мг/л за счет крупных динофлагеллят [Экосистема..., 1989 (Ekosistema..., 1989)].

В составе фитопланктона оз. Плещеева было обнаружено 185 таксонов рангом ниже рода: Cyanoprokaryota 16, Chrysophyta 16, Bacillariophyta 42, Xanthophyta 5, Cryptophyta 7, Dinophyta 5, Chlorophyta 83, Euglenophyta 11 [Сахарова, 2019 (Sakharova, 2019)]. Средняя за вегетационный сезон биомасса фитопланктона оз. Плещеево в 2014 г. составила 1 мг/л, в 2015 г. — 2.62 мг/л, что позволило отнести озеро к водоемам мезотрофного типа [Китаев, 2007 (Kitaev, 2007)]. Полученные величины рассматриваемого показателя не превышали значений, отмеченных ранее. В 1983 г. средняя биомасса фитопланктона за безледный период составила 2.32 мг/л [Экосистема..., 1989 (Ekosistema..., 1989)], а в 1990-е годы зарегистрировано некоторое снижение величин этого показателя и в 1990 г. он не превышал 1 мг/л [Пырина, Ляшенко, 1992 (Pirina, Lyashenko, 1992)]. Такие колебания в значениях средневегетационной биомассы фитопланктона можно считать незначительными. Однако в структуре фитопланктона по сравнению с 1980 и 1990 гг. произошли некоторые изменения. Отмечено увеличение роли криптофитовых водорослей в озере [Сахарова, 2019 (Sakharova, 2019)].

По результатам исследований 2014–2016 гг. экологическое состояние озера по показателям фитопланктона было удовлетворительным, оно характеризовалось как стабильно мезотрофное, олиго-бета-мезосапробное с невысокими биомассами цианобактерий [Сахарова, 2019 (Sakharova, 2019)]. Однако, начиная с 2017 г., в оз. Плещеево ежегодно наблюдают “цветения” воды, вызванные вспышками вегетации *G. echinulata*, и локальные заморы рыбы [Sidelev et al., 2024]. Ранее подобное явление для озера не отмечали [Экосистема..., 1989 (Ekosistema..., 1989); Костина, 1992 (Kostina,

1992); Сахарова, 2019 (Sakharova, 2019)]; Sidelev, Babanazarova, 2020].

Массовое “цветение” воды наблюдалось ежегодно в конце лета по всей акватории водоема (рис. 2). Связано это, видимо, с глобальными климатическими изменениями: высокие уровни воды в озере могли задействовать покоящиеся жизненные стадии; рост поверхностной и глубинной температуры озер; увеличение продолжительности летней стратификации и усиление придонной аноксии; увеличение количества аномальных ветров, приводящих к летней дестратификации.



Рис. 2. Космический снимок оз. Плещеево 9 сентября 2024 г. в момент активного “цветения” воды. (снимок сделан с использованием Информационной системы “Вега-Гидро” <http://hydro.geosmis.ru/>).

Fig. 2. Satellite image of Lake Pleshcheyevo on September 9, 2024, during the water bloom. (The image was taken using the Vega-Hydro Information System <http://hydro.geosmis.ru/>).

G. echinulata — крупная (диаметром 1–3 мм) нитевидная цианобактерия (рис. 3), образующая поверхностные пленки летом и способная продуцирующая гепатотоксин микроцистин-LR [Carey et al., 2007]. *G. echinulata* образует акинеты, имеет как пелагическую, так и бентосную фазы. После прорастания акинеты следует короткая фаза роста на осадке, после чего нити образуют газовые вакуоли и мигрируют в воду. Во время роста на поверхности осадка проростки поглощают питательные вещества. Эти питательные вещества используются в пелагической фазе, поскольку

пелагические колонии не обладают очень эффективным поглощением питательных веществ [Karlsson, 2003]. Истощение запасов фосфора ограничивает продолжительность планктонной фазы 15–20 сут. в “оптимальных” условиях роста. Наиболее важным фактором потерь из эпилимниона, по-видимому, является дрейф по поверхности, вызванный ветром. Массовое пополнение богатых фосфором бентосных колоний составляет две трети от общей чистой внутренней нагрузки фосфора (3.8 мг Р/м² в сут.) наблюдается в период с середины июля по середину августа [Istvánovics et al., 1993].

G. echinulata может быть видом, активно взаимодействующим с другими организмами в озерах с низким содержанием питательных веществ, и потенциально способным повысить устойчивость сообществ фитопланктона к будущим нарушениям за счет повышения стабильности состава и сложности сети [Carey et al., 2017]. *G. echinulata* могут выделять питательные вещества, такие как запасенный фосфор [Noges et al., 2004; Carey et al., 2008] или фиксированный азот [Stewart et al., 1967]. Цианобактерии продуцируют множество биологически активных вторичных метаболитов [Gross, 2003; Legrand et al., 2003], которые фитопланктон, возможно, научился распознавать и использовать для собственного метаболизма [Suikkanen et al., 2004]. Многие виды фитопланктона способны использовать растворенные органические соединения [Sanders et al., 1990; Tittel, Kamjunke, 2004]. *G. echinulata*, подобно другим цианобактериям, могут продуцировать антибактериальные или противогрибковые соединения, полезные для других видов фитопланктона [Legrand et al., 2003].



Рис. 3. Колония цианобактерии *Gloeotrichia echinulata* (фото А.С. Семеновой).

Fig. 3. Colony of *Gloeotrichia echinulata* (photo by A.S. Semenova).

В 2024 г. впервые получены данные о цианобактериальных токсинах и генах их биосинтеза в фитопланктоне мезотрофного оз. Плещеево в период “цветения” воды цианобактерией *G. echinulata* [Sidelev et al., 2024]. В фитопланктоне озера методом хромато-масс-спектрометрии обнаружено присутствие гепатотоксинов микроцистинов, а в ДНК, выделенной из планктона, методом ПЦР детектирован ген *mcuE* биосинтеза этих цианотоксинов. В период проведения исследования других типов цианотоксинов (цилиндроспермопсин, анатоксин-а, сакситоксины) и наличия генов их синтеза

в фитопланктоне не идентифицировано. В 30 колониях *G. echinulata*, изолированных из озера, гены *mcuA* и *mcuE* биосинтеза микроцистинов отсутствовали, что согласуется с их неспособностью к продуцированию цианотоксина. Показана потенциальная способность к биосинтезу микроцистинов цианобактерии *Microcystis aeruginosa* (Kützinger) Kützinger и видов рода *Dolichospermum*, обитающих в озере, с использованием молекулярных методов. Обсуждаются вопросы токсичности *G. echinulata* и необходимость дальнейшего долгосрочного мониторинга токсигенных цианобактерий в оз. Плещеево.

Изменения в экосистеме оз. Плещеево, предшествующие появлению *G. echinulata*

На основании анализа опубликованных данных, архивных материалов и результатов оригинальных исследований Е.В. Чемерис с соавторами [2020 (Chemeris et al., 2020)] выявлен ряд изменений, произошедших в растительном покрове оз. Плещеево с 1899 по 2017 гг. Произошли заметные изменения в структуре доминантов растительного покрова: полностью исчезли харовые луга из *Chara* sp., практически исчезли ценозы *Zannichellia palustris* L., уменьшение проективного покрытия характерных для озера ценозов (*Potamogeton perfoliatus*, *Ranunculus circinatus* Sibth.). Появились сообщества, типичные для загрязненных вод (*Ceratophyllum demersum* L., *Cladophora* sp.) и сообщества, характерные для нарушенных местообитаний (*Elodea canadensis* Michx.) [Чемерис и др., 2020 (Chemeris et al., 2020)]. Наблюдается незначительное возрастание площадей прибрежно-водной растительности (особенно сообществ *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.). Эти процессы связаны с естественным старением водоема и возрастанием антропогенной нагрузки. Общая степень зарастания озера остается низкой (~5%) и не будет возрастать в ближайшей и отдаленной перспективе из-за незначительной площади литорали, доступной для водных растений, преобладания песчаного грунта и гидродинамических особенностей водоема [Чемерис и др., 2020 (Chemeris et al., 2020)].

Харовые водоросли (Charophyta), относящиеся к погруженным макрофитам, играют важную роль в поддержании прозрачности воды в водоемах, активно подавляя развитие цианобактерий. *Chara* sp. выделяют в воду вторичные метаболиты, которые действуют как природные альгициды [Kurashov, 2021]. Аллелохимикаты, выделяемые харовыми, способны ингибировать фотосинтез цианобактерий, в частности, нарушая работу фотосистемы II. Помимо воздействия на фотосинтез, эти вещества подавляют рост, деление клеток и жизнеспособность

цианобактерий, тем самым предотвращая “цветение” воды [Zhu et al., 2010].

В 1980-е гг. в оз. Плещеево появился моллюск *Dreissena polymorpha* Pallas, 1771 [Жгарева, 1992 (Zhigareva, 1992)]. Взрослые моллюски зарегистрированы с 1984 г., а личинки дрейссены отмечены впервые осенью 1987 г. [Жгарева, 1992 (Zhigareva, 1992); Столбунова, 2006 (Stolbunova, 2006)] и с тех пор ежегодно встречаются в планктоне озера [Zhdanova, 2018]. Вселение дрейссены повлекло за собой изменения в сообществах озера. В зоопланктоне с появлением личинки дрейссены средняя численность зоопланктона уменьшилась в 1.8 раза, коловраток — в 2.1 раза [Столбунова, 2006 (Stolbunova, 2006); Zhdanova, 2018]. Плотва, один из массовых видов рыб, всего за одно поколение образовала быстрорастущую дрейссеноядную форму [Касьянов, Изюмов, 1995 (Kasyanov, Izyumov, 1995)]. Дрейссениды способствуют деэвтрофированию пелагиали водоемов, поскольку активно осаждают и аккумулируют сестон на дне водоема. Они перераспределяют поток вещества и энергии от планктона к бентосу (бентификация) и в мелководных водоемах усиливают динамическое взаимодействие между пелагиалью и бенталью [MacIsaac et al., 1999]. Дрейссена в больших количествах осаждают содержащуюся в воде взвесь, которая сконцентрирована в виде агглютинатов и фекалий и представляет собой хороший корм для многих детритофагов. Прямые трофические связи определяются накоплением в поселениях фекалий и агглютинатов дрейссенид [Пряничникова, 2020 (Pryanichnikova, 2020)]. Снижение уровня сапробности озера по организмам бентоса также может свидетельствовать о значительной роли дрейссены в водоеме, как естественного биофильтра [Pryanichnikova, Tsvetkov, 2018].

Дрейссены — активные фильтраторы. Они эффективно поедают многие виды фитопланктона, но часто “отвергают” крупные колониальные цианобактерии, такие как *G. echinulata*. Это создает конкурентное преимущество для последних, способствуя их цветению в присутствии мидий. Фильтруя воду, дрейссены повышают ее прозрачность, что позволяет солнечному свету проникать глубже. Это может стимулировать рост донных водорослей и колониальных форм, таких как глеотрихия, которые могут подниматься из донных осадков в толщу воды. Свет проникает на большую глубину. Поскольку глеотрихия на ранних стадиях развивается в донных отложениях, улучшение освещенности дна стимулирует их более быстрый рост и массовый “всплыв”

(рекрутирование) в толщу воды [Pettersson, 2012]. Пропуская через себя воду, моллюски выделяют азот и фосфор в биодоступной форме прямо в придонный слой и толщу воды. Эти локальные выбросы биогенных веществ (преимущественно фосфора) служат отличным удобрением для глеотрихии, которая начинает свой жизненный цикл на дне, а затем поднимается на поверхность.

Присутствие *D. polymorpha* в водоеме часто становится катализатором для массового развития глеотрихии. Вместо того, чтобы очищать воду от всех микроводорослей, дрейссены “выкашивают” только полезные виды, косвенно поддерживая размножение потенциально токсичных цианобактерий.

Режим водного питания озера определяется как климатическими факторами, так и особенностями геологического строения водосбора. Основной приток озера — р. Трубеж — берет начало в Берендеевском болоте на водоразделе бассейнов Оки и Верхней Волги. Длина р. Трубеж 32 км, ширина и глубина в устье 36 и 2–3 м соответственно. Река имеет несколько десятков мелких притоков. В ее устьевой области расположен г. Переславль-Залесский, оказывающий существенное влияние на качество воды. Остальные притоки озера представляют собой мелкие речки и ручьи длиной <10 км. Вытекает из озера р. Векса, впадающая в оз. Сомино. Длина реки 8 км, ширина у истока 21 м, наибольшая глубина ~1.5 м. Водное питание озера тесно связано с подземными водами, о чем свидетельствуют родники и самоизливающиеся скважины на его побережье [Otyukova, 2021].

Наблюдается обмеление р. Трубеж, впадающей в озеро, которая подпитывается водами Берендеева болота. В 1950-е гг. была создана система осушительных каналов для интенсификации торфоразработок, основной поток вод болота был направлен в р. Малый Киржач, что нарушило питание реки, привело к заиливанию, снижению уровня грунтовых вод и критическому обмелению. В 1980 г. благодаря отводу основной части стоков в оз. Сомино, минуя р. Трубеж, снизился уровень основных элементов солевого состава в реке и стабилизировался их режим [Экосистема..., 1989 (Ekosistema..., 1989)]. О влиянии города на качество воды р. Трубеж свидетельствует значительное увеличение содержания натрия, калия, сульфатов, хлоридов, биогенных элементов [Отюкова, 2020 (Otyukova, 2020)].

На оз. Плещеево практически отсутствует система гидрометеорологического мониторинга, за исключением уровнемерного поста на акватории озера и периодических

измерений расходов воды сотрудниками национального парка. Этого явно недостаточно, чтобы судить о многолетних тенденциях водности впадающих в озеро рек и делать

обоснованные заключения о происходящих климатических изменениях в его бассейне и количественных характеристиках приходной и расходной составляющих водного баланса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До недавнего времени оз. Плещеево считалось одним из самых чистых водоемов в Центральной России, но уже в 2022 г. получило класс “загрязненный”. Вследствие нарушения экологического баланса пострадать может не только рыба — озеро является источником водоснабжения для г. Переславль-Залесский. Существует высокий риск, что через несколько лет его нельзя будет использовать как источник питьевого водоснабжения из-за вероятного наличия в воде цианотоксинов и других метаболитов, которые могут выделять водоросли. Участвовавшие случаи гипоксии в озере приводят к смерти рыбы и других гидробионтов и способствуют выделению в воду фосфора из донных отложений, стимулирующего эвтрофированию.

Массовое развитие *Gloeotrichia echinulata* в оз. Плещеево вызвано комплексом антропогенных и климатических факторов. Увеличение концентрации питательных веществ, в частности фосфора в донных осадках, стимулирует активный рост водорослей. Это связано с хозяйственной деятельностью, поступлением сточных вод с прилегающих территорий. Повышение температуры воды создает благоприятные условия для теплолюбивых цианобактерий, способствуя их бурному размножению. Снижение скорости водообмена в озере приводит к застою воды, что создает благоприятную среду для цветения *G. echinulata*. Глеотрихия способна эффективно усваивать фосфор из донных отложений и накапливать его, что

дает преимущество перед другими видами планктона в условиях изменения экосистемы.

Развитие глеотрихии представляет угрозу для экосистемы озера, в частности для эндемика — переславской ряпушки, из-за отмирания водорослей и последующего снижения уровня кислорода. Высокая численность глеотрихии стимулирует развитие других видов токсичных цианобактерий. Глеотрихия способна переносить фосфор из донных отложений в толщу воды, ускоряя процесс “цветения” и ухудшая качество воды. Ее массовое развитие создает угрозу не только для экосистемы, но и для системы водоснабжения г. Переславля-Залесского.

План мероприятий (“дорожная карта”) по сохранению и реабилитации оз. Плещеево в Ярославской области был утвержден в 2025 г. Он разработан совместно с участием различных министерств и ведомств. К сожалению, в Дорожную карту вошли не все мероприятия, которые направлены на снижение поступления загрязненных сточных вод в озеро, — важнейшее направление для сохранения и реабилитации озера. Озеро Плещеево может стать полигоном для разработки российских природоподобных технологий в сфере очистки сточных вод, удаление биомассы высшей водной растительности и водорослей (для изъятия фосфора и других нежелательных веществ из экосистемы). Следует учитывать, что сохранение и реабилитация оз. Плещеево напрямую связано с благополучием жителей г. Переславля-Залесского и его развитием.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность сотрудникам национального парка “Плещеево озеро” за помощь в организации экспедиционных работ и сборе необходимого материала.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 124032100076-2 и 1025121900005-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балонов И.М. Изменение сапробности озера Плещеево // Вопросы формирования природных вод в условиях антропогенного воздействия. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 87–89.
- Борисов П.Г. Ряпушка озера Переславского // Тр. Науч. ин-та рыб. хоз-ва. 1924. Т. 1. С. 53–127.
- Жгарева Н.Н. Состав и распределение фауны зарослей озера Плещеево // Факторы и процессы эвтрофикации оз. Плещеево. Ярославль: Ярославский государственный университет, 1992. С. 95–105.
- Ильинский А.Л. О фитопланктоне озер Ярославской области // Озера Ярославской области и перспективы их хозяйственного использования. Ярославль: Ярославский государственный педагогический институт, 1970. С. 273–303.
- Кастальская-Карзинкина М.А. Количественный и весовой учет планктона Переславского озера // Тр. Лимнол. ст. в Косине. 1934. Вып. 17. С. 71–83.

- Касьянов А.Н., Изюмов Ю.Г. К изучению роста и морфологии плотвы *Rutilus rutilus* оз. Плещеево в связи с все-лением дрейссены // Вопросы ихтиологии. 1995. Т. 35, № 4. С. 546–548.
- Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробионтов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.
- Костина Т.Б. Фитопланктон озера Плещеево в 1990 г. // Факторы и процессы эвтрофикации озера Плещеево. Ярославль: Ярославский государственный университет, 1992. С. 28–39.
- Ляшенко О.А. Сравнительный анализ планктонных альгофлор озер Неро и Плещеево // Бот. журн. 2003. Т. 88, № 3. С. 30–35.
- Отюкова Н.Г. Гидрохимический режим притоков озера Плещеево (Ярославская область) // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2020. Вып. 90(93). С. 27–32. DOI: 10.24411/0320-3557-2020-10010.
- Поддубный С.А., Цветков А.И., Иванова И.Н. и др. Термические и динамические процессы в озере Плещеево // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2020. Вып. 90(93). С. 7–26. DOI: 10.34680/90-93-2020-7-26.
- Пряничникова Е.Г. Макробентос биоценоза *Dreissena polymorpha* озера Плещеево // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2020. Вып. 90(93). С. 53–65. DOI: 10.34680/90-93-2020-53-65.
- Пырина И.Л., Ляшенко О.А. Состав и продуктивность фитопланктона озера Плещеево на современном этапе // Труды Всерос. науч. конф. 1992. Вып. 3. С. 48–54.
- Сахарова Е.Г. Фитопланктон озера Плещеево в 2014–2016 гг. // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2019. Вып. 86(89). С. 23–33. DOI: 10.34680/86-89-2019-23-29.
- Столбунова В.Н. Зоопланктон озера Плещеево. М.: Наука, 2006. 152 с.
- Чемерис Е.В., Кутузов А.В., Ефимов Д.Ю., Гришуткин О.Г. Изменение растительного покрова оз. Плещеево (Ярославская обл.) с 1899 по 2017 гг. // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2020. Вып. 90(93). С. 33–52. DOI: 10.24411/0320-3557-2020-10011.
- Экосистема озера Плещеево. Л.: Наука, 1989. 264 с.
- Becker A. Beitrage zu meinen Verzeichnissen der um Sarepta und am Bogdo vorkommenden Pflanzen und Insekten etc. // Bull. Soc. Imp. Nat. Moscou. 1880. Vol. 55, № 1. P. 115–156.
- Bennas N., Abellán P., Sánchez-Fernández D., Millán A. Ochthebius (Ochthebius) lanarotis Ferro, 1985 (Coleoptera, Hydraenidae), un coleoptere endemique marocain specifique des milieux aquatiques hypersalin // Bol. Soc. Entomol. Aragon. 2008. № 43. P. 361–366.
- Bruno J.F., Stachowicz J.J., Bertness M.D. Inclusion of facilitation into ecological theory // Trends Ecol. Evol. 2003. Vol. 18. P. 119–125. DOI: 10.1016/S0169-5347(02)00045-9.
- Carey C.C., Brown B.L., Cottingham K.L. The cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* increases the stability and network complexity of phytoplankton communities // Ecosphere. 2017. Vol. 8, № 7. Art. e01830. DOI: 10.1002/ecs2.1830.
- Carey C.C., Ewing H.A., Cottingham K.L. et al. Occurrence and toxicity of the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* in low-nutrient lakes in the northeastern United States // Aquat. Ecol. 2012. Vol. 46, № 4. P. 395–409. DOI: 10.1007/s10452-012-9409-9.
- Carey C.C., Haney J.F., Cottingham K.L. First report of microcystin-LR in the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* // Environ. Toxicol. 2007. Vol. 22. P. 337–339. DOI: 10.1002/tox.20277.
- Carey C.C., Rengefors K. The cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* stimulates the growth of other phytoplankton // J. Plankton Res. 2010. Vol. 32, № 9. P. 1349–1354. DOI: 10.1093/plankt/fbq046.
- Carey C.C., Weathers K.C., Cottingham K.L. *Gloeotrichia echinulata* blooms in an oligotrophic lake: helpful insights from eutrophic lakes // J. Plankton Res. 2008. Vol. 30. P. 893–904. DOI: 10.1093/plankt/fbn055.
- Ger K.A., Urrutia-Cordero P., Frost P.C. et al. The interaction between cyanobacteria and zooplankton in a more eutrophic world // Harmful Algae. 2016. Vol. 54. P. 128–144. DOI: 10.1016/j.hal.2015.12.005.
- Gross E.M. Allelopathy of aquatic autotrophs // Crit. Rev. Plant Sci. 2003. Vol. 22. P. 313–339. DOI: 10.1080/713608316.
- Halpern B.S., Silliman B.R., Olden J.D. et al. Incorporating positive interactions in aquatic restoration and conservation // Front. Ecol. Environ. 2007. Vol. 5. P. 153–160. DOI: 10.1890/1540-9295(2007)5[153:IPIAR]2.0.CO;2.
- Havens K.E. Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems // Cyanobacterial harmful algal blooms: state of the science and research needs / ed. Hudnell H.K. New York: Springer, 2008. P. 733–747. DOI: 10.1007/978-0-387-75865-7_33.
- Istvánovics V., Pettersson K., Rodrigo M.A. et al. *Gloeotrichia echinulata*, a colonial cyanobacterium with a unique phosphorus uptake and life strategy // J. Plankton Res. 1993. Vol. 15, № 5. P. 531–552. DOI: 10.1093/plankt/15.5.531.
- Karlsson I. Benthic growth of *Gloeotrichia echinulata* Cyanobacteria // Hydrobiologia. 2003. Vol. 506. P. 189–193. DOI: 10.1023/B:HYDR.0000008570.03256.00.
- Karlsson-Elfgren I., Rydin E., Hyenstrand P. et al. Recruitment and pelagic growth of *Gloeotrichia echinulata* (Cyanophyceae) in Lake Erken // J. Phycol. 2003. Vol. 39. P. 1050–1056.
- Korneva L.G., Glushchenko G.Y. Composition and Seasonal Succession of Phytoplankton of Taganrog Bay in the Sea of Azov and the Downstream Reaches of the Don River under a Changing Climate // Inland Water Biol. 2020. Vol. 13. P. 23–30. DOI: 10.1134/S1995082920010071.
- Kurashov E., Krylova J., Protopopova E. The use of allelochemicals of aquatic macrophytes to suppress the development of cyanobacterial “blooms” // Plankton Communities. London: IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.95609.

- Legrand C., Rengefors K., Fistarol G.O. et al. Allelopathy in phytoplankton – biochemical, ecological and evolutionary aspects // *Phycologia*. 2003. Vol. 42. P. 406–419.
- MacIsaac, H.J., Johannsson, O.E., Ye, J. et al. Filtering impacts of an introduced Bivalve (*Dreissena polymorpha*) in a shallow lake: application of a hydrodynamic model // *Ecosystems*. 1999. Vol. 2. P. 338–350.
- Nõges T., Tonno I., Laugaste R. et al. The impact of changes in nutrient loading on cyanobacterial dominance in Lake Peipsi (Estonia/Russia) // *Arch. Hydrobiol.* 2004. Vol. 160. P. 261–279. DOI: 10.1127/0003-9136/2004/0160-0261.
- O’Neil J.M., Davis T.W., Burford M.A. et al. The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change // *Harmful Algae*. 2012. Vol. 14. P. 313–334. DOI: 10.1016/j.hal.2011.10.027.
- Otyukova N.G. Organic Matter in Water Bodies in Especially Protected Natural Territories: Case Study of Tributaries of Lake Pleshcheyevo, Yaroslavl Oblast, and Tributaries of the Tadenka River in Prioksko-Terrasnyi Nature Reserve, Moscow Oblast // *Water Resour.* 2021. Vol. 48. P. 449–458. DOI: 10.1134/S0097807821030118.
- Paerl H.W., Huisman J. Blooms like it hot // *Science*. 2008. Vol. 320, № 5872. P. 57–58. DOI: 10.1126/science.1155398.
- Paerl H.W., Otten T.G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls // *Microb. Ecol.* 2013. Vol. 65, № 4. P. 995–1010. DOI: 10.1007/s00248-013-0234-1.
- Pettersson K. Limnological Studies in Lake Erken Sweden // *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Encyclopedia of Earth Sciences Series* / eds. Bengtsson L., Herschy R.W., Fairbridge R.W. Dordrecht: Springer, 2012. DOI: 10.1007/978-1-4020-4410-6_120.
- Pryanichnikova E.G., Tsvetkov A.I. Main characteristics of the Lake Pleshcheyevo population of *Dreissena polymorpha* (Bivalvia, Dreissenidae) // *Ecosystem Transformation*. 2018. Vol. 1, Iss. 2. P. 11–18. DOI: 10.23859/estr-180723a.
- Sanders R.W., Porter K.G., Caron D.A. Relationship between phototrophy and phagotrophy in the mixotrophic chrysophyte *Poterioochromonas malhamensis* // *Microb. Ecol.* 1990. Vol. 19. P. 97–109. DOI: 10.1007/BF02015056.
- Sidelev S.I., Babanazarova O.V. Detection of cyanobacterial toxins in water supply sources and tap water in some Russian cities: searching producers and testing removal methods // *Water Resour.* 2020. Vol. 47, Iss. 2. P. 304–314. DOI: 10.1134/S0097807820020189.
- Sidelev S.I., Korneva L.G., Chernova E.N. et al. First Data on Cyanotoxins and Genes of Their Biosynthesis in the Phytoplankton of the Mesotrophic Lake Pleshcheyevo (Russia) during the Bloom Formation of *Cyanobacterium Gloeotrichia echinulata* // *Inland Water Biol.* 2024. Vol. 17. P. 1161–1171. DOI: 10.1134/S1995082924700688.
- Stewart W.D., Fitzgerald G.P., Burris R.H. In situ studies on N₂ fixation using the acetylene reduction technique // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 1967. Vol. 58. P. 2071–2078. DOI: 10.1073/pnas.58.5.2071.
- Suikkanen S., Fistarol G.O., Granéli E. Allelopathic effects of the Baltic cyanobacteria *Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon flos-aquae*, and *Anabaena lemmermannii* on algal monocultures // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2004. Vol. 308. P. 85–101. DOI: 10.1016/j.jembe.2004.02.012.
- Suikkanen S., Fistarol G.O., Granéli E. Effects of cyanobacterial allelochemicals on a natural plankton community // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2005. Vol. 287. P. 1–9. DOI: 10.3354/meps287001.
- Tillmanns A.R., Wilson A.E., Pick F.R., Sarnelle O. Meta-analysis of cyanobacterial effects on zooplankton population growth rate: species-specific responses // *Fundam. Appl. Limnol.* 2008. Vol. 171, № 4. P. 285–295. DOI: 10.1127/1863-9135/2008/0171-0285.
- Tittel J., Kamjunke N. Metabolism of dissolved organic carbon by planktonic bacteria and mixotrophic algae in lake neutralization experiments // *Freshwater Biol.* 2004. Vol. 49. P. 1062–1071. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2004.01241.x.
- Wejnerowski L., Cerbin S., Dziuba M.K. Thicker filaments of *Aphanizomenon gracile* are more harmful to *Daphnia* than thinner *Cylindrospermopsis raciborskii* // *Zool. Stud.* 2015. Vol. 54, № 1. P. 2. DOI: 10.1186/s40555-014-0084-5.
- Wilson A.E., Sarnelle O., Tillmanns A.R. Effects of cyanobacterial toxicity and morphology on the population growth of freshwater zooplankton: meta-analyses of laboratory experiments // *Limnol. Oceanogr.* 2006. Vol. 51, № 4. P. 1915–1924. DOI: 10.4319/lo.2006.51.4.1915.
- Zaytseva T.B., Medvedeva N.G. Impact of Biogenic Elements on the Growth of Bloom-Forming Filamentous Cyanobacteria and Formation of Metabolites // *Inland Water Biol.* 2022. Vol. 15. P. 305–314. DOI: 10.1134/S1995082922030166.
- Zhdanova S.M. Veliger larvae of *Dreissena* (Bivalvia, Dreissenidae) in the zooplankton of Lake Pleshcheyevo (Yaroslavl Region, Russia) // *Ecosystem Transformation*. 2018. Vol. 1, № 2. P. 19–29. DOI: 10.23859/estr-180424.
- Zhu J., Liu B., Wang J. et al. Study on the mechanism of allelopathic influence on cyanobacteria and chlorophytes by submerged macrophyte (*Myriophyllum spicatum*) and its secretion // *Aquat. Toxicol.* 2010. Vol. 98, № 2. P. 196–203. DOI: 10.1016/j.aquatox.2010.02.011.

REFERENCES

- Balonov I.M. Izmeneniye saprobnosti ozera Pleshcheyevo [Changes in the saprobity of Lake Pleshcheyevo]. *Voprosy formirovaniya prirodnikh vod v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya*, 1981, pp. 17–23. (In Russia)
- Becker A. Beitrage zu meinen Verzeichnissen der um Sarepta und am Bogdo vorkommenden Pflanzen und Insekten etc. *Bull. Soc. Imp. Nat. Moscou*, 1880, vol. 55, no. 1, pp. 115–156.
- Bennas N., Abellán P., Sánchez-Fernández D., Millán A. Ochthebius (Ochthebius) lanarotis Ferro, 1985 (Coleoptera, Hydraenidae), un coleoptere endemique marocain specifique des milieux aquatiques hypersalin. *Bol. Soc. Entomol. Aragon.*, 2008, no. 43, pp. 361–366.
- Borisov P.G. Ryapushka ozera Pereslavskogo [Vendace of Lake Pereslavskoye]. *Tr. Nauch. Inst. Ryb. Khoz.*, 1924, vol. 1, pp. 53–127. (In Russia)

- Bruno J.F., Stachowicz J.J., Bertness M.D. Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends Ecol. Evol.*, 2003, vol. 18, no. 3, pp. 119–125. doi: 10.1016/S0169-5347(02)00045-9.
- Carey C.C., Brown B.L., Cottingham K.L. The cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* increases the stability and network complexity of phytoplankton communities. *Ecosphere*, 2017, vol. 8, no. 7, pp. e01830. doi: 10.1002/ecs2.1830.
- Carey C.C., Ewing H.A., Cottingham K.L. et al. Occurrence and toxicity of the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* in low-nutrient lakes in the northeastern United States. *Aquat. Ecol.*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 395–409. doi: 10.1007/s10452-012-9409-9.
- Carey C.C., Haney J.F., Cottingham K.L. First report of microcystin-LR in the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata*. *Environ. Toxicol.*, 2007, vol. 22, no. 3, pp. 337–339. doi: 10.1002/tox.20277.
- Carey C.C., Rengefors K. The cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* stimulates the growth of other phytoplankton. *J. Plankton Res.*, 2010, vol. 32, no. 9, pp. 1349–1354. doi: 10.1093/plankt/fbq046.
- Carey C.C., Weathers K.C., Cottingham K.L. *Gloeotrichia echinulata* blooms in an oligotrophic lake: helpful insights from eutrophic lakes. *J. Plankton Res.*, 2008, vol. 30, no. 8, pp. 893–904. doi: 10.1093/plankt/fbn055.
- Chemeris E.V., Kutuzov A.V., Efimov D.Y., Grishutkin O.G. Changes in the vegetation cover of Lake Pleshcheyevo (Yaroslavl region) from 1899 to 2017. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2020, iss. 90(93), pp. 33–52. doi: 10.34680/90-93-2020-33-52. (In Russia)
- Ekosistema озера Pleshcheyevo [Ecosystem of Lake Pleshcheyevo]. Leningrad, Nauka, 1989. 264 p. (In Russia)
- Ger K.A., Urrutia-Cordero P., Frost P.C. et al. The interaction between cyanobacteria and zooplankton in a more eutrophic world. *Harmful Algae*, 2016, vol. 54, pp. 128–144. doi: 10.1016/j.hal.2015.12.005.
- Gross E.M. Allelopathy of aquatic autotrophs. *Crit. Rev. Plant Sci.*, 2003, vol. 22, no. 3–4, pp. 313–339. doi: 10.1080/713608316.
- Halpern B.S., Silliman B.R., Olden J.D. et al. Incorporating positive interactions in aquatic restoration and conservation. *Front. Ecol. Environ.*, 2007, vol. 5, no. 3, pp. 153–160. doi: 10.1890/1540-9295(2007)5[153:IPIAR]2.0.CO;2.
- Havens K.E. Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems. *Cyanobacterial harmful algal blooms: state of the science and research needs*, New York, Springer, 2008, pp. 733–747. doi: 10.1007/978-0-387-75865-7_33.
- Il'inskiy A.L. On the phytoplankton of lakes in the Yaroslavl Region. *Ozera Yaroslavskoy oblasti i perspektivy ikh khozyaystvennogo ispol'zovaniya*, Yaroslavl, Yaroslavskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy institut, 1970, pp. 273–303. (In Russia)
- Istvánovics V., Pettersson K., Rodrigo M.A. et al. *Gloeotrichia echinulata*, a colonial cyanobacterium with a unique phosphorus uptake and life strategy. *J. Plankton Res.*, 1993, vol. 15, no. 5, pp. 531–552. doi: 10.1093/plankt/15.5.531.
- Karlsson I. Benthic growth of *Gloeotrichia echinulata* Cyanobacteria. *Hydrobiologia*, 2003, vol. 506, no. 1, pp. 189–193. doi: 10.1023/B:HYDR.0000008570.03256.00.
- Karlsson-Elfgren I., Rydin E., Hyenstrand P., Erken L. Recruitment and pelagic growth of *Gloeotrichia echinulata* (Cyanophyceae) in Lake Erken. *J. Phycol.*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 1050–1056. doi: 10.1111/j.0022-3646.2003.03-010.x.
- Kastal'skaya-Karzinkina M.A. Kolichestvennyy i vesovoy uchet planktona Pereslavskogo озера [Quantitative and weight assessment of plankton in Lake Pereslavskoye]. *Tr. Limnol. Stn. Kosine*, 1934, no. 17, pp. 71–83. (In Russia)
- Kas'yanov A.N., Izyumov Yu.G. K izucheniyu rosta i morfologii plotvy *Rutilus rutilus* oz. Pleshcheyevo v svyazi s vveleniyem dreysseny [On the study of growth and morphology of roach *Rutilus rutilus* from Lake Pleshcheyevo in connection with the introduction of zebra mussels]. *Voprosy ichtiologii*. 1995. vol. 35, no. 4. pp. 546–548. (In Russia)
- Kitayev S.P. Osnovy limnologii dlya gidrobiontov i ikhtologov [Fundamentals of Limnology for Hydrobionts and Ichthyologists]. Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN, 2007, 395 p. (In Russia)
- Korneva L.G., Glushchenko G.Y. Composition and Seasonal Succession of Phytoplankton of Taganrog Bay in the Sea of Azov and the Downstream Reaches of the Don River under a Changing Climate. *Inland Water Biol.*, 2020, vol. 13, pp. 23–30. doi: 10.1134/S1995082920010071.
- Kostina T.B. Fitoplanktona озера Pleshcheyevo v 1990 g. [Phytoplankton of Lake Pleshcheyevo in 1990]. *Fakty i protsessy evtrofikatsii озера Pleshcheyevo*. Yaroslavl, Yaroslavskiy gosudarstvennyy universitet, 1992, pp. 28–39. (In Russia)
- Kurashov E., Krylova J., Protopopova E. The use of allelochemicals of aquatic macrophytes to suppress the development of cyanobacterial “blooms”. *Plankton Communities*. London, IntechOpen, 2022. doi: 10.5772/intechopen.95609.
- Legrand C., Rengefors K., Fistarol G.O. et al. Allelopathy in phytoplankton — biochemical, ecological and evolutionary aspects. *Phycologia*, 2003, vol. 42, no. 4, pp. 406–419. doi: 10.2216/i0031-8884-42-4-406-1.
- Lyashenko O.A. Sravnitel'nyy analiz planktonnykh al'goflor ozer Nero i Pleshcheyevo [Comparative analysis of planktonic algal floras of Lakes Nero and Pleshcheyevo]. *Bot. Zhurn.*, 2003, vol. 88, no. 3, pp. 30–35. (In Russia)
- MacIsaac H.J., Johannsson O.E., Ye J. et al. Filtering impacts of an introduced Bivalve (*Dreissena polymorpha*) in a shallow lake: application of a hydrodynamic model. *Ecosystems*, 1999, vol. 2, pp. 338–350.
- Nöges T., Tonno I., Laugaste R., et al. The impact of changes in nutrient loading on cyanobacterial dominance in Lake Peipsi (Estonia/Russia). *Arch. Hydrobiol.*, 2004, vol. 160, no. 2, pp. 261–279. doi: 10.1127/0003-9136/2004/0160-0261.
- O'Neil J.M., Davis T.W., Burford M.A., Gobler C.J. The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 2012, vol. 14, pp. 313–334. doi: 10.1016/j.hal.2011.10.027.
- Otyukova N.G. Hydrochemical regime of the tributaries of Lake Pleshcheyevo (Yaroslavl region). *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2020, iss. 90(93), pp. 27–32. doi: 10.34680/90-93-2020-27-32. (In Russia)

- Otyukova N.G. Organic Matter in Water Bodies in Especially Protected Natural Territories: Case Study of Tributaries of Lake Pleshcheyevo, Yaroslavl Oblast, and Tributaries of the Tadenka River in Prioksko-Terrasnyi Nature Reserve, Moscow Oblast. *Water Resour.*, 2021, vol. 48, no. 3, pp. 449–458. doi: 10.1134/S0097807821030118.
- Paerl H.W., Huisman J. Blooms like it hot. *Science*, 2008, vol. 320, no. 5872, pp. 57–58. doi: 10.1126/science.1155398.
- Paerl H.W., Otten T.G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microb. Ecol.*, 2013, vol. 65, no. 4, pp. 995–1010. doi: 10.1007/s00248-013-0234-1.
- Pettersson K. Limnological Studies in Lake Erken Sweden. Bengtsson L., Herschy R.W., Fairbridge R.W. (Eds.) *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Dordrecht, Springer, 2012. doi: 10.1007/978-1-4020-4410-6_120.
- Poddubnyy S.A., Tsvetkov A.I., Ivanova I.N. et al. Thermal and dynamic processes in Lake Pleshcheyevo. Termicheskiye i dinamicheskiye protsessy v ozere Pleshcheyevo [Thermal and dynamic processes in Lake Pleshcheyevo]. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2020, iss. 90(93), pp. 7–26. doi: 10.34680/90-93-2020-7-26. (In Russia)
- Pryanichnikova E.G. Macrobenthos of the Dreissena polymorpha biocenosis of Lake Pleshcheyevo. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2020, iss. 90(93), pp. 53–65. doi: 10.34680/90-93-2020-53-65. (In Russia)
- Pryanichnikova E.G., Tsvetkov A.I. Main characteristics of the Lake Pleshcheyevo population of Dreissena polymorpha (Bivalvia, Dreissenidae) // Ecosystem Transformation 2018. Vol. 1 Iss. 2. P. 11–18. doi: 10.23859/estr-180723a.
- Pyrina I.L., Lyashenko O.A. Composition and productivity of phytoplankton of Lake Pleshcheyevo at the present stage. *Trudy Vserossiyskoy Nauchnoy Konferentsii*, 1992, no. 3, pp. 48–54. (In Russia)
- Sakharova E.G. Phytoplankton of Lake Pleshcheyevo in 2014–2016. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2019, iss. 86(89), pp. 23–33. doi: 10.34680/86-89-2019-23-29. (In Russia)
- Sanders R.W., Porter K.G., Caron D.A. Relationship between phototrophy and phagotrophy in the mixotrophic chrysophyte Poteriodochromonas malhamensis. *Microb. Ecol.*, 1990, vol. 19, no. 1, pp. 97–109. doi: 10.1007/BF02015056.
- Sidelev S.I., Babanazarova O.V. Detection of cyanobacterial toxins in water supply sources and tap water in some Russian cities: searching producers and testing removal methods. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, no. 2, pp. 304–314. doi: 10.1134/S0097807820020189.
- Sidelev S.I., Korneva L.G., Chernova E.N. et al. First Data on Cyanotoxins and Genes of Their Biosynthesis in the Phytoplankton of the Mesotrophic Lake Pleshcheyevo (Russia) during the Bloom Formation of Cyanobacterium Gloeotrichia echinulata. *Inland Water Biol.*, 2024, vol. 17, no. 6, pp. 1161–1171, doi: 10.1134/S1995082924700688.
- Stewart W.D., Fitzgerald G.P., Burris R.H. In situ studies on N₂ fixation using the acetylene reduction technique. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 1967, vol. 58, pp. 2071–2078. DOI: 10.1073/pnas.58.5.2071.
- Stolbunova V.N. Zooplankton озера Pleshcheyevo [Zooplankton of Lake Pleshcheyevo]. Moscow, Nauka, 2006. 152 p. (In Russia)
- Suikkanen S., Fistarol G.O., Granéli E. Allelopathic effects of the Baltic cyanobacteria Nodularia spumigena, Aphanizomenon flos-aquae, and Anabaena lemmermannii on algal monocultures. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 2004, vol. 308, no. 1, pp. 85–101. doi: 10.1016/j.jembe.2004.02.012.
- Suikkanen S., Fistarol G.O., Granéli E. Effects of cyanobacterial allelochemicals on a natural plankton community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2005, vol. 287, pp. 1–9. doi: 10.3354/meps287001.
- Tillmanns A.R., Wilson A.E., Pick F.R., Sarnelle O. Meta-analysis of cyanobacterial effects on zooplankton population growth rate: species-specific responses. *Fundam. Appl. Limnol.*, 2008, vol. 171, no. 4, pp. 285–295. doi: 10.1127/1863-9135/2008/0171-0285.
- Tittel J., Kamjunke N. Metabolism of dissolved organic carbon by planktonic bacteria and mixotrophic algae in lake neutralization experiments. *Freshwater Biol.*, 2004, vol. 49, no. 8, pp. 1062–1071. doi: 10.1111/j.1365-2427.2004.01241.x.
- Trifonova I.S. Ekologiya i suksessiya ozernogo fitoplanktona [Ecology and Succession of Lake Phytoplankton]. Leningrad, Nauka, 1990. 180 p. (In Russia)
- Wejnerowski L., Cerbin S., Dziuba M.K. Thicker filaments of Aphanizomenon gracile are more harmful to Daphnia than thinner Cylindrospermopsis raciborskii. *Zool. Stud.*, 2015, vol. 54, no. 1, pp. 2. doi: 10.1186/s40555-014-0084-5.
- Wilson A.E., Sarnelle O., Tillmanns A.R. Effects of cyanobacterial toxicity and morphology on the population growth of freshwater zooplankton: meta-analyses of laboratory experiments. *Limnol. Oceanogr.*, 2006, vol. 51, no. 4, pp. 1915–1924. doi: 10.4319/lo.2006.51.4.1915.
- Zaytseva T.B., Medvedeva N.G. Impact of Biogenic Elements on the Growth of Bloom-Forming Filamentous Cyanobacteria and Formation of Metabolites. *Inland Water Biol.*, 2022, vol. 15, iss. 3, pp. 305–314. doi: 10.1134/S1995082922030166.
- Zhdanova S.M. Veliger larvae of Dreissena (Bivalvia, Dreissenidae) in the zooplankton of Lake Pleshcheyevo (Yaroslavl Region, Russia). *Ecosyst. Transform.*, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 19–29. doi: 10.23859/estr-180424.
- Zhgareva N.N. Sostav i raspredelenie fauny zarosley озера Pleshcheyevo [Composition and distribution of the fauna of thickets of Lake Pleshcheyevo]. *Fakty i protsessy evtrofikatsii озера Pleshcheyevo*. Yaroslavl, Yaroslavskiy gosudarstvennyy universitet, 1992, pp. 95–105. (In Russia)
- Zhu J., Liu B., Wang J. et al. Study on the mechanism of allelopathic influence on cyanobacteria and chlorophytes by submerged macrophyte (Myriophyllum spicatum) and its secretion. *Aquat. Toxicol.*, 2010, vol. 98, no. 2, pp. 196–203. doi: 10.1016/j.aquatox.2010.02.011.

**CYANOBACTERIUM *GLOEOTRICHIA ECHINULATA*
BLOOM IN LAKE PLESHCHEYEVO: CAUSES AND CONSEQUENCES**

A. N. Sharov*

Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences

*152742 Borok, Russia, e-mail: *sharov@ibiw.ru*

Revised 27.03.2026

This article reviews publications on the development of the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* in oligotrophic and mesotrophic lakes, with a special focus on Lake Pleshcheyevo (Yaroslavl region, Russia). The study summarizes the results of phytoplankton investigations conducted over the past 100 years. Since 2017, annual blooms caused by *G. echinulata* have been observed in the lake. The mass development of this cyanobacterium is driven by a combination of anthropogenic and climatic factors: increased phosphorus loads from adjacent watersheds, rising water temperatures, and reduced water exchange, which promotes stagnation. *G. echinulata* plays a key role in internal phosphorus loading by transferring this element from bottom sediments into the water column, thereby accelerating eutrophication and further stimulating bloom formation. The proliferation of *G. echinulata* poses a serious threat to the lake's ecosystem, particularly to the endemic Pereslavl vendace (*Coregonus albula*), and may facilitate the concurrent development of other toxic cyanobacteria. Moreover, mass blooms degrade water quality and jeopardize the municipal water supply of the town of Pereslavl-Zalessky.

Keywords: Gleotrichia, water bloom, phytoplankton, cyanotoxins, water quality