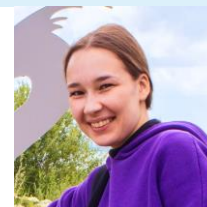


Цветение водоемов: экологические аспекты и распространение *Gloeotrichia echinulata* в озере Плещеево

Д.А. Тарасова^{1*}

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

* tarasowadarja@gmail.com



Ключевые слова фитопланктон, эвтрофикация, цианобактерии, цианотоксины, глеотрихия

Аннотация Озеро Плещеево — важный природный объект, выполняющий функции источника питьевой воды, зоны рекреации и охраняемой природной территории. В последние годы в озере отмечаются признаки нарастающей эвтрофикации, а с 2017 года — массовое развитие колониальной цианобактерии *Gloeotrichia echinulata*. В статье рассматриваются возможные причины появления этого вида, включая особенности жизненного цикла и стратегии питания *G. echinulata*. Отдельное внимание уделяется её роли как вида, модифицирующего экосистему, и потенциальной токсичности. На основе анализа данных предлагается рассматривать вспышку *G. echinulata* как индикатор глубоких изменений в экосистеме озера. Подчеркивается необходимость постоянного мониторинга, оценки экологических рисков и разработки стратегии адаптивного управления.

1 Введение

Эвтрофикация представляет собой одну из наиболее важных и серьезных экологических проблем, стоящих перед водными системами суши во всем мире [1]. Этот процесс представляет собой чрезмерное поступление биогенных веществ, в частности соединений азота и фосфора, в водные объекты. На глобальном уровне поступление фосфора в реки и океаны увеличилось примерно в три раза по сравнению с историческими показателями, достигнув 22 млн тонн в год [2]. Основные источники этих веществ подразделяются на две категории: внешние (аллохтонные), поступающие с хозяйственно-бытовыми сточными водами, поверхностным и подземным стоком с территорий, в том числе с земель сельскохозяйственного пользования и населенных пунктов [1], а также внутренние (автохтонные), связанные с динамикой биогенов в самом водоеме. Например, к внутренним

процессам относится высвобождение фосфора из донных отложений [3]. Сброс неочищенных промышленных стоков, а также ливневых и сточных вод с территории городов, существенно меняет важнейшие для функционирования характеристики водоемов.

Последствия эвтрофикации очень серьезны. Эвтрофикация приводит к снижению видового разнообразия, быстрому обмелению и доминированию детритных пищевых цепей. Одним из наиболее заметных и опасных проявлений эвтрофикации является массовое развитие микроводорослей или «цветение» воды, часто вызываемое цианобактериями (сине-зелеными водорослями) [4]. Такие «цветения» изменяют абиотические факторы водного объекта, напрямую влияя на рост, разнообразие и плотность биотических компонентов, и, как следствие, на структуру и характеристики водной среды. Это серьезный урон для рыболовства и туризма, а также для здоровья человека, поскольку некоторые виды цианобактерий выделяют токсины, опасные для людей и других живых организмов [5,6]. Наиболее опасными считаются гепатотоксины (микроцистин, цилиндропермолпсин) и нейротоксины (сакситоксины). Самым изученным из них является гепатотоксин микроцистин, считающийся потенциальным канцерогеном для человека [7,8,9]. Известно, что он способен продуцироваться представителями родов *Microcystis*, *Anabaena*, *Planktothrix* и *Nostoc* [10], а также *Dolichospermum* и *Oscillatoria*, однако виды, продуцирующие цианотоксины в одних климатических условиях, не всегда способны к синтезу токсинов в других условиях [11]. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, в России для питьевых вод, вод водных объектов хозяйственнопитьевого и культурно-бытового водопользования, плавательных бассейнов и аквапарков предельно допустимая концентрация МС-LR составляет 1 мкг/л. Еще одним серьезным последствием является гипоксия (образование бескислородной зоны) или даже аноксия, возникающая в результате разложения отмирающей биомассы водорослей¹. Низкий уровень растворенного кислорода является показателем эвтрофикации [12,13].

Масштабы проблемы эвтрофикации являются глобальными. Она затрагивает озера и реки по всему миру. Примерами являются озеро Мирик, озеро Белландур, озеро Робертсон, реки Кавери и Ганг в Индии [1], озеро Пейпси в Эстонии [14] и озеро Констанц в Германии². Недавние исследования с использованием спутниковых снимков показали, что за последние 40 лет (1984-2021 г.) десятки тысяч озер по всему миру изменили свой цвет, что свидетельствует об изменениях в их экологическом состоянии [15]. Изучались спутниковые снимки, охватывающие 67579 водоёмов площадью более одного квадратного километра, что составляет около 39% всей озёрной поверхности планеты. С помощью искусственного интеллекта исследователи оценили динамику изменения цвета водоёмов, связывая её с такими факторами, как температура воздуха, количество осадков, объём воды и плотность

¹ Ansari A., Gill S. Eutrophication: Causes, Consequences and Control Volume-2. 2014.

² Kümmerlin R. Taxonomical response of the phytoplankton community of Upper Lake Constance (Bodensee-Obersee) to eutrophication and reoligotrophication // Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Adv. Limnol. 1998. V. 53. P. 109-117.

населения в бассейне озера. За почти 38 лет более половины (60%) исследованных водоёмов изменили свой цвет. Наиболее заметные изменения цвета отмечались в густонаселённых районах, что указывает на прямое воздействие антропогенных факторов на экологическое состояние водоёмов. Исследование продемонстрировало значительную динамику в изменении цвета озёр по всему миру, что отражает изменения в их экологическом состоянии и подчёркивает влияние как природных, так и антропогенных факторов на водные экосистемы.

Существующие взгляды на причины развития эвтрофикации подчеркивают ключевую роль фосфора как лимитирующего элемента для большинства пресноводных экосистем. Увеличение содержания фосфора способствует доминированию цианобактерий. Исторически производители моющих средств оспаривали роль фосфора, утверждая, что лимитирующим элементом является углерод, но многочисленные исследования, включая крупномасштабные эксперименты на озерах, убедительно доказали критическую роль фосфора [3]. Основными источниками поступления фосфора являются интенсивное использование фосфатсодержащих моющих средств и сельскохозяйственных удобрений.

Например, в Уругвае моющие средства составляли 58% суточной нагрузки фосфора в Рио-де-ла-Плата, а использование фосфорных удобрений достигало 40000 тонн в год [1]. Экспериментальные исследования показали, что даже распространенные моющие средства значительно увеличивают сухой вес, содержание хлорофилла и поглощение N, P, K водными растениями. Внутренние процессы в водоемах, например, высвобождение фосфора из донных отложений, играют значительную роль в биогеохимических круговоротах элементов на уровне водной экосистемы [16,17]. Кроме того, глобальное потепление усугубляет проблему, способствуя более интенсивному цветению водорослей, в том числе за счет активации акинет (покоящихся клеток) цианобактерий, которые зимуют в донных отложениях и прорастают при благоприятных условиях³. Актуальность рассмотрения механизмов эвтрофикации особенно важна на примере конкретных водоёмов. Значение озера Плещеево как источника питьевой воды, а также центра туризма и отдыха в Переславле-Залесском, делает проблему массового развития цианобактерий особенно острой и требующей научного внимания.

2 Материалы и методы

В ходе работы был проведён комплексный анализ научной литературы, посвящённой экологическому состоянию озера Плещеево, включая исследования биогенной нагрузки, биологической продуктивности, явлений цветения, а также структурно-функциональных характеристик сообществ фитопланктона, зоопланктона и других гидробионтов. Особое внимание уделялось публикациям, рассматривающим динамику альгоценозов,

³ Dokulil M., Teubner K. Eutrophication and climate change: present situation and future scenarios // Eutrophication: causes, consequences and control. Springer, Dordrecht. 2011. P. 1-16.

гидробиологические показатели и влияние антропогенных факторов на экосистему озера. В их числе – отчеты о проведенных научно-исследовательских работах ИБВВ РАН на оз. Плещеево. Детально изучены публикации, описывающие экологические аспекты жизнедеятельности цианобактерии *Gloeotrichia echinulata*, включая особенности её жизненного цикла, сезонную динамику развития и пространственно-временную встречаемость в экосистеме озера. Дополнительно в рамках научно-исследовательской экспедиции «Интеллектуальный хранитель наследия "Плещеево озеро"» (Национальный парк «Плещеево озеро», г. Переславль-Залесский, Ярославская обл.) были проведены полевые рекогносцировочные наблюдения для уточнения современного состояния водоема.

2.1 Трофический статус озера Плещеево

Анализ многолетних наблюдений за содержанием хлорофилла «а», проведенных Институтом биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина в озере Плещеево^{4,5,6}, позволяет выделить несколько ключевых периодов. В 1980-е годы концентрация хлорофилла «а» была наиболее высокой по сравнению с последующими десятилетиями. В 1990-е годы и в 2014 году этот показатель находился на значительно более низком уровне, что свидетельствует о снижении продуктивности водоема. В 2015 году среднее за вегетационный сезон содержание общего хлорофилла «а» составило 4.16 ± 2.06 мкг/л, что соответствует характеристикам мезотрофного водоема. Однако максимальная фотосинтетическая активность фитопланктона в этом году достигла значений, характерных для эвтрофных водоемов, что отличает 2015 год от 1980-х и 2014 года, когда показатели не превышали уровня умеренной мезотрофии.

В 2017 году динамика содержания хлорофилла «а» была следующей: в мае — от 1.09 до 7.95 мкг/л (среднее 2.80 ± 1.58 мкг/л), в июне — от 2.50 до 4.77 мкг/л (среднее 3.44 ± 0.79 мкг/л), в августе — от 1.57 до 4.30 мкг/л (среднее 2.66 ± 0.73 мкг/л), в сентябре — от 1.65 до 18.23 мкг/л (среднее 3.95 ± 3.81 мкг/л). В целом, колебания концентрации хлорофилла «а» в течение года были незначительными и свидетельствовали о мезотрофном статусе водоема на большинстве станций, за исключением одной из исследуемых станций, где осенью наблюдались эвтрофные значения. Анализ данных за последние четыре года (2014–2017) подтверждает эту тенденцию: концентрация хлорофилла «а» составила 3.7 ± 1.6 мкг/л (2014), 4.2 ± 2.1 мкг/л (2015), 3.5 ± 1.2 мкг/л (2016) и 3.1 ± 1.4 мкг/л (2017). Эти значения сопоставимы с ранее полученными и позволяют отнести озеро к мезотрофному типу.

Структура фитопланктона также претерпела изменения. В 2014 году отмечались незначительные биомассы фитопланктона и отсутствие выраженных пиков развития

⁴ Экосистема озера Плещеево. Л.: Наука, 1989. 264 с

⁵ Отчет ИБВВ РАН о НИР по теме: «Мониторинг биогенной нагрузки на оз. Плещеево». Борок, 2017. 112 с.

⁶ Отчет ИБВВ РАН о НИР по теме: «Комплексное исследование экосистемы оз. Плещеево». Борок, 2015. 220 с.

водорослей, что подтверждает мезотрофный статус водоема. В 2015 году средняя за вегетационный сезон биомасса фитопланктона составила 2.62 мг/л, что также соответствует мезотрофному типу. Это значение выше, чем в предыдущем году (1 мг/л). Сравнительный анализ с 1980-ми и 1990-ми годами выявил увеличение вклада криптофитовых водорослей в биомассу, что может свидетельствовать о росте трофии, так как криптомонады способны к миксотрофному питанию. В целом, массовое развитие синезеленых водорослей (с преобладанием видов рода *Anabaena* и *Aphanizomenon flos – aquae*) было характерным для озера в летний период, что подтверждается исследованиями 1989, 1992, 1996, 2016 г. Однако в 2017 году впервые за четырехлетний период наблюдений была зарегистрирована активная вегетация синезеленых водорослей, в частности, вида *Gloeotrichia echinulata*, что ранее не отмечалось. Массовое «цветение» этого вида наблюдалось в конце лета по всей акватории озера.

Зоопланктонное сообщество озера Плещеево по большинству показателей также соответствует мезотрофному типу. Однако расчеты по фаунистическому индексу трофности А.Х. Мяэметса⁶ указывают на эвтрофный статус водоема. В 2017 году среднее значение коэффициента трофности в открытой литоральной зоне составило 1.88, что характеризует ее как эвтрофную, а отдельные участки — как гипертрофные. Анализ таких показателей, как соотношение биомассы Cyclopoida к биомассе Calanoida (BCycl/BCal) и отношение биомассы зоопланктона к биомассе фитопланктона (Bz/Bph), подтверждает усиление процессов эвтрофирования, что связано с увеличением доли всеядных копепод.

Многолетние данные по бентосу указывают на принадлежность литорали и сублиторали озера к β-мезосапробной зоне, а профундали — к α-мезосапробной. В 2013–2016 годах по шкале трофности С.П. Китаева⁷ и данным биомассы макробентоса озеро соответствует α-мезотрофному типу. В 2017 году 71% видов бентоса литорали являлись индикаторами β-мезосапробной зоны, что подтверждает стабильность этой характеристики.

Отмечается, что притоки оз. Плещеево преимущественно питаются талыми водами во время весеннего половодья и имеют низкий меженный уровень. Они являются постоянным источником биогенных и органических веществ. Наибольшие концентрации минеральных форм азота и фосфора наблюдаются в периоды высокой воды, когда происходит активный смыв органики с водосборной площади, что приводит к повышенному содержанию взвешенных веществ как в притоках, так и в озере.

В озере Плещеево отмечается явление придонной гипоксии в периоды летней и зимней стагнации, что фиксируется с первой половины XX века. С 2014 по 2017 год летняя придонная гипоксия проявляется ежегодно, а высота анаэробного слоя достигает 10 м. В

⁶ Мяэметс А. Х. Изменения зоопланктона // Антропогенное воздействие на малые озера. Л.: Наука, 1980. С. 54–64.

⁷ Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.

2015 году наблюдались повышенная температура и гипоксия гипolimниона, что способствует ускорению эвтрофикации. Кратковременные похолодания и ветровое перемешивание оказывают большее влияние на развитие придонной гипоксии, чем высокая средняя температура воздуха в течение вегетационного сезона. Дополнительным фактором риска является возможное попадание «поровой» воды в гипolimнион при гомотермии и сильных ветрах, что может привести к повышению уровня трофии. Глобальное потепление, сопровождающееся частой сменой циклонов и антициклонов с сильными ветрами, а также «размытием» переходных периодов между сезонами, усиливает риск эвтрофикации. Заросли макрофитов в литоральной зоне и микрофитобентос в зоне заплеска играют важную буферную роль, максимально утилизируя поступающие с водосбора биогены. Рекреационная нагрузка, а также поступление биогенов с водосбора, включая сточные воды и поверхностный сток, являются основными факторами, влияющими на динамику биогенных элементов в озере.

2.2 *Gloeotrichia echinulata*: особенности вида и вспышка цветения в озере Плещеево

Gloeotrichia echinulata — колониальная цианобактерия, относящаяся к порядку Nostocales и семейству Rivulariaceae, которая характеризуется нитчатой формой, способностью к фиксации азота и образованию покоящихся стадий, известных как акинеты [18]. В отличие от большинства видов *Gloeotrichia*, обитающих в прибрежной зоне и прикрепленных к субстратам, *G. echinulata* является единственным истинно планктонным видом, содержащим газовые вакуоли, что обеспечивает ей плавучесть и делает важным компонентом планктона в озерах по всему миру [19,20]. Жизненный цикл *G. echinulata* включает как пелагическую, так и бентосную фазы [18] (рис. 1).

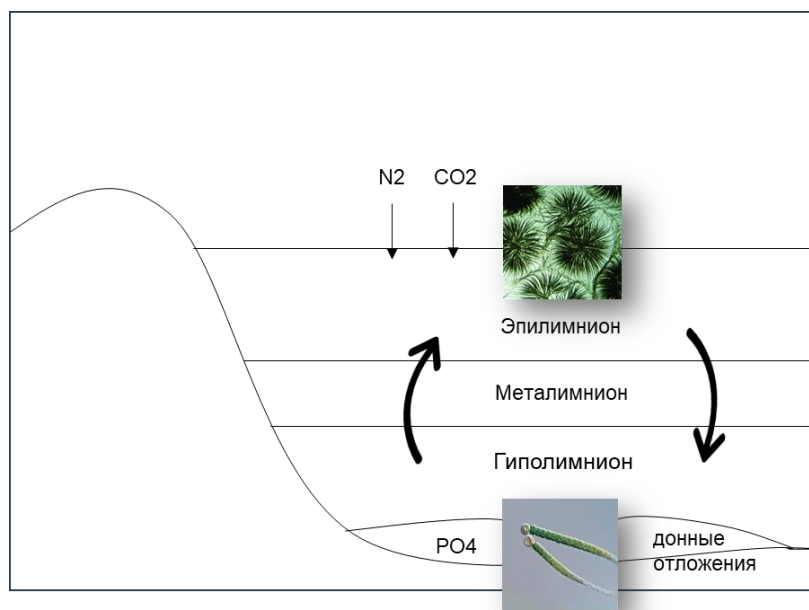


Рис. 1. Схематическое представление жизненного цикла *G. Echinulata*

Fig. 1. Schematic representation of the life cycle *G. Echinulata*

Акинеты, образующиеся пелагическими колониями, оседают на дно озера и перезимовывают в осадках, а весной они прорастают и развиваются на поверхности осадка

перед тем, как формируют газовые вакуоли и мигрируют в водную толщу [21]. Одной из наиболее значимых экологических особенностей *G. echinulata* является ее уникальная стратегия поглощения и переноса фосфора (P)⁸. В период роста на поверхности осадка проростки *G. echinulata* активно поглощают избыточное количество фосфора из богатой этим элементом поровой воды донных отложений. Запасной фосфор может составлять около 45% от общего содержания фосфора в покоящихся колониях, достигая 8,5 мкг Р на мг сухой массы или 81 нг Р на колонию⁹. Этот внутренний запас фосфора затем используется колониями во время их роста в пелагической зоне, поскольку эффективность поглощения питательных веществ непосредственно из водной толщи у них низкая. Кроме того, *G. echinulata* способна к фиксации атмосферного азота, что является еще одним важным источником питательных веществ, который может стать доступным для других фитопланктонных организмов в водной толще [21].

G. echinulata давно известна как доминирующий компонент фитопланктонного сообщества в эвтрофных озерах, часто образуя массовые цветения летом. Однако в последние десятилетия наблюдается увеличение численности *G. echinulata* и образование цветений в олиготрофных и мезотрофных озерах северо-востока США и Канады [19]. Это явление является необычным для систем с низким содержанием питательных веществ. Исследования показали, что *G. echinulata* широко распространена в низкопитательных озерах северо-востока США, присутствуя в водной толще в 27 из 37 обследованных озер [21]. Хотя плотность колоний обычно низкая (менее 5 колоний на литр), иногда она может достигать уровней, достаточных для образования поверхностной пены (до 250 колоний на литр в обследованных озерах, и до 5000 колоний на литр в литоральной зоне озера Эркен из-за ветрового скопления) [20]. Пик численности и рекрутмента *G. echinulata* в озере Санапи (олиготрофное озеро) наблюдался в конце августа, что отличается от более ранних пиков, характерных для эвтрофных систем. Рекрутмент колоний происходит преимущественно с мелководных участков (глубина 1–2 м) как в олиготрофных, так и в эвтрофных озерах, с ограниченным рекрутментом с больших глубин (>5 м) из-за недостатка света. Вклад рекрутмента из донных отложений в общую численность пелагической популяции *G. echinulata* в озере Санапи составляет 20–45%, что соответствует диапазону, наблюдаемому в эвтрофных озерах (3–50%), и значительно выше, чем для большинства других видов фитопланктона [19]. Наличие фосфора в донных отложениях, вероятно, стимулирует прорастание акинет и последующий рекрутмент, что подтверждается полевыми наблюдениями и лабораторными экспериментами.

⁸ Istvanovics V., Pettersson M., Rodrigo D, Pierson J. *Gloeotrichia echinulata*, a colonial cyanobacterium with a unique phosphorus uptake and life strategy // Journal of Plankton Research. 1993. V. 15. P. 531–552.

⁹ Pettersson K., Herlitz E., Istvánovics V. The role of *Gloeotrichia echinulata* in the transfer of phosphorus from sediments to water in Lake Erken // Springer Netherlands, Dordrecht. 1993. ISBN 978-94-011-1598-8. S. 123–129.

Кроме того, *G. echinulata* производит микроцистин-LR (MC-LR), хотя и в низких концентрациях [22]. Исследования показали, что MC-LR обнаруживается во всех образцах *G. echinulata*, хотя его концентрации значительно варьируются между озерами. Несмотря на то, что текущие концентрации MC-LR в водной толще, обусловленные *G. echinulata*, как правило, значительно ниже норм, рекомендованных Всемирной организацией здравоохранения для питьевой воды, увеличение плотности *G. echinulata* до уровня массового цветения может привести к концентрациям, способным оказывать негативное воздействие на водные организмы и представлять риск для здоровья человека, вызывая, например, раздражение кожи у купающихся [21].



Рис.2а. Колонии *G. Echinulata* можно наблюдать в пробах воды невооруженным глазом. Гидробиологическое обследование озера Плещеево в экспедиции, июль 2024

Fig.2a. Colonies of *G. Echinulata* can be observed in water samples with the naked eye. Hydrobiological examination of Lake Pleshcheyevo in expedition, July 2024

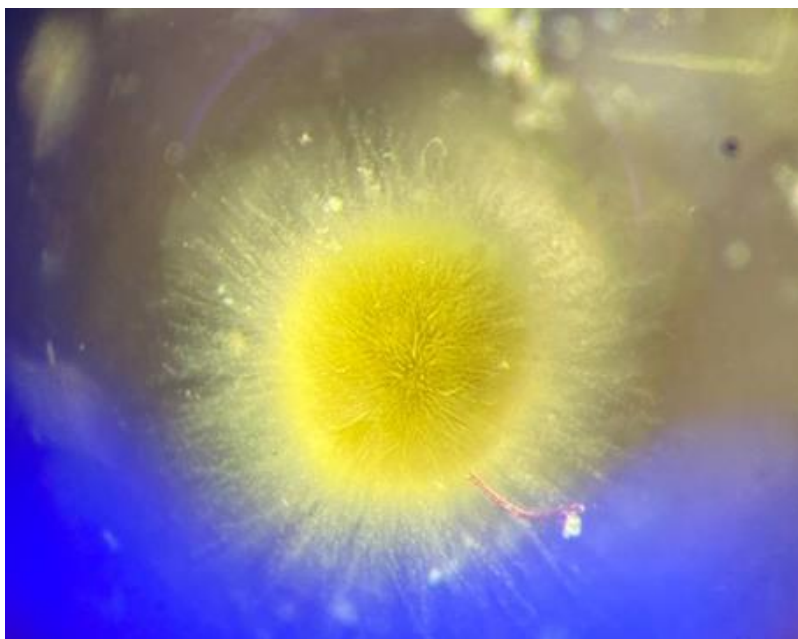


Рис. 2б. Колония *G. echinulata*, отобранная в процессе гидробиологического обследования озера в ходе экспедиции, июль 2024. Микроскоп МБС-9, увеличение 90х.

Fig. 2b. Colony of *G. echinulata*, selected during the hydrobiological survey of the lake during the expedition, July 2024

С 2017 года в озере Плещеево ежегодно наблюдается цветение воды, вызванное цианобактериями *Gloeotrichia echinulata*, что вызывает особую тревогу в связи с нарастающей биогенной нагрузкой и гипоксией (рис. 2а и 2б).

Ранее это явление не отмечалось. Кроме того, в августе 2023 г. в Администрацию ФГБУ «Национальный парк «Плещеево озеро» поступило обращение о том, что на р. Вёкса наблюдается замор рыбы. Поскольку озеро с 1988 года является источником открытого водозабора для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения города Переславль-Залесский, качество воды и возможная токсичность продуктов жизнедеятельности цианобактерий вызывает серьезную обеспокоенность.

В работе [23] с использованием методов молекулярной биологии (ПЦР с универсальными праймерами *HEP* и *msuAC*) было показано, что в ДНК, выделенной из колоний *G. echinulata* в озере Плещеево, не обнаружился ген, ответственный за синтез микроцистинов. В то же время в планктонной ДНК был обнаружен ген биосинтеза *msuE*, принадлежащий видам *Microcystis* и *Dolichospermum*. Авторы отмечают, что случаи отравления животных и людей при купании в водоеме или при употреблении воды из него в период цветения вероятнее связаны с воздействием метаболитов других цианобактерий, поэтому вопрос о токсичности *G. echinulata* остается спорным.

Исследования показывают, что многие представители фитопланктона, включая некоторые цианобактерии, реагируют на повышенную доступность питательных веществ, обусловленную фиксацией азота *Gloeotrichia* и переносом фосфора из донных отложений. В эксперименте с мезокосмами было замечено, что нитчатые цианобактерии *Anabaena* и *Oscillatoria* увеличивали биомассу сразу после добавления *G. echinulata*. *Gloeotrichia* может выделять биоактивные вторичные метаболиты или антибактериальные/противогрибковые соединения, которые способствуют росту фитопланктона [24]. Таким образом, общие данные показывают, что *Gloeotrichia* действует как вид, способный изменять структуру и стабильность сообщества фитопланктона, в том числе способствуя росту других цианобактерий.

3 Результаты и обсуждение

Результаты анализа экологического состояния озера Плещеево свидетельствуют о его переходном положении между мезотрофным и эвтрофным типами. Хотя значения хлорофилла «а», биомассы фитопланктона и зоопланктона в последние годы соответствуют мезотрофии, наблюдаются признаки нарастающего эвтрофирования: устойчивое проявление гипоксии, рост доли всеядных копепод и увеличение фаунистического индекса трофности. Особенно тревожным является зафиксированное с 2017 года массовое развитие колониальной цианобактерии *Gloeotrichia echinulata*, ранее не наблюдавшейся. Это свидетельствует о качественном изменении фитопланктонного сообщества и возможной перестройке всей водной экосистемы.

Причины появления *G. echinulata* именно в 2017 году, по-видимому, многофакторны и представляют собой результат взаимодействия абиотических и биотических факторов. Во-первых, важным условием стал высокий уровень воды в литоральной зоне,

наблюдавшийся в 2017 году. Продолжительное стояние воды на мелководьях создало благоприятные условия для прорастания акинет *Gloeotrichia* в донных отложениях, с последующей миграцией колоний в толщу воды. Это особенно важно с учётом двойной жизненной стратегии этого вида, включающей бентосную и пелагическую фазы. Во-вторых, озеро Плещеево демонстрирует признаки нарастающего эвтрофирования, подтверждённые многолетними исследованиями ИБВВ РАН. Увеличение внешнего и внутреннего поступления биогенных веществ, особенно фосфора — лимитирующего элемента для пресных водоёмов, — создаёт питательную среду для цианобактерий. *G. echinulata* способна аккумулировать фосфор из поровой воды в донных отложениях и использовать его в пелагической фазе, тем самым увеличивая внутреннюю нагрузку на озеро и усиливая круговорот биогенов, включая передачу азота и фосфора другим компонентам фитопланктона.

Важным контекстом является и глобальное изменение климата, проявляющееся в изменении температурного и гидрологического режима. Интересно, что 2017 год оказался наиболее холодным за период 2004–2017 гг. Несмотря на то, что массовые цветения цианобактерий обычно ассоциируются с потеплением, понижение температуры могло изменить устойчивость термоклина, способствовать стабилизации стратификации и усилить гипоксические процессы. Это, в свою очередь, приводит к более активному высвобождению фосфора из донных отложений.

Дополнительную роль сыграли гидрологические особенности года: весной притоки озера принесли большое количество взвешенного материала и биогенов, что особенно заметно при высоких водах. Кроме того, в структуре биологической фильтрации могли произойти изменения. Заросли макрофитов, играющие буферную роль в утилизации биогенов, в 2017 году, возможно, испытали нагрузку или сокращение площади, что могло снизить их эффективность. Ослабление этой функции ведёт к усилению воздействия поступающих биогенов на пелагическое сообщество.

Важно отметить, что *G. echinulata* может играть активную роль в модификации экосистемы. Помимо поглощения и переноса фосфора, она способна фиксировать атмосферный азот, выделять биоактивные вещества, изменяющие структуру фитопланктонного сообщества, и стимулировать рост других цианобактерий. В экспериментах было показано, что её присутствие увеличивает биомассу других водорослей и усложняет сеть взаимодействий в фитопланктоне. Несмотря на потенциальную токсичность *G. echinulata*, в частности синтез микроцистина-LR, молекулярно-генетические исследования показали отсутствие соответствующих генов у её популяций в Плещеевом озере. Тем не менее, в планктонной ДНК были обнаружены гены токсичности других цианобактерий (*Microcystis*, *Dolichospermum*), что делает актуальным мониторинг токсичности водоема в целом, особенно в периоды цветения.

4 Выводы

Таким образом, массовое цветение *Gloeotrichia echinulata* в 2017 году можно рассматривать как следствие комплексного воздействия: высокого уровня воды, изменения климата, усиления трофии, поступления биогенов и, возможно, ослабления буферных механизмов. Возникновение этого феномена может служить индикатором сдвига экосистемы озера в сторону эвтрофного состояния.

Разложение массы бурно развившихся сине-зеленых водорослей сопровождается рядом опасных явлений: дефицитом кислорода, выделением токсинов, бактериальным загрязнением, образованием ароматических веществ. Вода, насыщенная продуктами метаболизма водорослей, аллергенна, токсична. Все это свидетельствует о недопустимости использования в питьевых целях воды из мест скопления водорослей и водоемов, подверженных сильному цветению, поскольку токсическое вещество водорослей не обезвреживается системами обычной водоочистки и может попадать в водопроводную сеть.

Массовое развитие водорослей в водоеме значительно затрудняет рекреационное использование водного источника, а также является причиной помех в техническом водоснабжении. С учётом важности Плещеева озера как источника питьевой воды и объекта в составе особо охраняемой природной территории, выявленные изменения требуют постоянного мониторинга, оценки экологических рисков и разработки стратегии адаптивного управления качеством водной среды.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» (МИИГАуК). Публикация осуществлена при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» <https://rgo.ru/>.

Автор выражает признательность наставникам проекта к.б.н. Кузнецовой Г.Д., доценту кафедры космического мониторинга и экологии МИИГАуК, и д.г.н. Браткову В.В., зав. кафедрой географии МИИГАуК, а также научному сотруднику лаборатории гидрологии и гидрохимии Института биологии внутренних вод им. Папанина РАН Цветкову А.И.

Библиография

1. Khan F., Ansari A. Eutrophication: An Ecological Vision // The Botanical Review. 2005. V. 71. P. 449–482.
2. Solomon A. Eutrophication: Causes, Consequences, Physical, Chemical and Biological Techniques for Mitigation Strategies // Environmental Challenges. 2023. V.12. 100733.

3. Schindler D. Recent advances in the understanding and management of eutrophication // *Limnology and Oceanography*. 2006. V. 51. P. 356–363.
4. Ho H., Park C., Yoo K., Kim N., Hwang S. Survival and Development Strategies of Cyanobacteria through Akinete Formation and Germination in the Life Cycle // *Water*. 2024. V. 16(5). 770.
5. Svirčev Z., Drobac D., Tokodi N., Mijović B., Codd G.A., Meriluoto J. Toxicology of microcystins with reference to cases of human intoxications and epidemiological investigations of exposures to cyanobacteria and cyanotoxins // *Archives of Toxicology*. 2017. V. 91. I. 2. P. 621–650.
6. Svirčev Z., Lali D., Bojadžija Savić G., Tokodi N., Drobac Backović D., Chen L., Meriluoto J., Codd G. Global geographical and historical overview of cyanotoxin distribution and cyanobacterial poisonings // *Archives of Toxicology*. 2019. V. 93. P. 2429–2481.
7. Zhang S., Du X., Liu H., Losiewicz M., Chen X., Ma Y., Wang R., Tian Z., Shi L., Guo H. The latest advances in the reproductive toxicity of microcystin-LR // *Environ. Res*. 2021. V. 192. 110254.
8. Lone Y., Koiri R., Bhide M. An overview of the toxic effect of potential human carcinogen Microcystin-LR on testis // *Toxicol. Rep*. 2015. V. 2. P. 289–296.
9. Mbukwa E., Msagati T., Mamba B. Quantitative Variations of Intracellular Microcystin-LR, -RR and -YR in Samples Collected from Four Locations in Hartbeespoort Dam in North West Province (South Africa) During the 2010/2011 Summer Season // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2012. V. 9. P. 3484–3505.
10. Волошко Л.Н., Плющ А.В., Титова Н.Н. Токсины цианобактерий (Cyanobacteria, Cyanophyta) // *Альгология*. 2008. Т. 18. № 1. С. 3–20.
11. Kutjavina T, Ashikhmina T. Distribution of toxigenic cyanobacteria in water bodies of the East European Plain // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. P. 154–164.
12. Coffin, M., Courtenay S., Pater C., Heuvel M.R.v.D. An empirical model using dissolved oxygen as an indicator for eutrophication at a regional scale // *Mar. Pollut. Bull*. 2018. V. 133. P. 261–270
13. Rosales D., Ellett A., Jacobs J., Ozbay G., Parveen S. Pitula, J. Investigating the Relationship between nitrate, total dissolved nitrogen, and phosphate with abundance of pathogenic Vibrios and harmful algal blooms in Rehoboth Bay, Delaware // *Appl. Environ. Microbiol*. 2022. V. 88. e00356-22.
14. Agasild H., Panksep K., Tõnno I., Blank K., Kõiv T., Freiberg R., Laugaste R., Jones R., Nõges P., Noges T. Role of potentially toxic cyanobacteria in crustacean zooplankton diet in a eutrophic lake // *Harmful Algae*. 2019. V. 89. 101688.

15. Shen X., Ke C.-Q., Duan Z., Cai Y., Li H., Xiao Y. Satellite observations reveal widespread color variations in global lakes since the 1980s // *Water Resources Research*. 2025. V. 61. e2023WR036926.
16. Huerta Buitrago B., Rodríguez Mozaz S., Nannou C., Nakis L., Ruhí i Vidal A., Acuña i Salazar V., Sabater S., Barceló i Cullerés D. Determination of a broad spectrum of pharmaceuticals and endocrine disruptors in biofilm from a waste water treatment plant-impacted river // *Sci. Total Environ*. 2016. V. 540. P. 241–249.
17. Hupfer M., Lewandowski J. Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments – a long-lasting paradigm in limnology // *Int. Rev. Hydrobiol*. 2008. V. 93. P. 415–432.
18. Karlsson-Elfgren I. Benthic growth of *Gloeotrichia echinulata* Cyanobacteria // *Hydrobiologia*. 2003. V. 506–509. P. 189–193.
19. Carey C., Weathers K., Cottingham K. *Gloeotrichia echinulata* blooms in an oligotrophic lake: Helpful insights from eutrophic lakes // *Journal of Plankton Research*. 2008. V. 30. P. 893–904.
20. Eiler A., Olsson J., Bertilsson S. Diurnal variations in the auto- and heterotrophic activity of cyanobacterial phycospheres (*Gloeotrichia echinulata*) and the identity of attached bacteria // *Freshwater Biology*. 2006. V. 51(2). P. 298–311.
21. Carey C., Ewing H., Cottingham K., Weathers K., Thomas Q., Haney J. Occurrence and toxicity of the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* in low-nutrient lakes in the northeastern United States // *Aquatic Ecology*. 2012. V. 46.
22. Carey C., Haney J., Cottingham K. First report of microcystin-LR in the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* // *Environ. Toxicol*. 2007. V. 22. P. 337–339.
23. Sidelev S.I., Korneva L.G., Chernova E.N. 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. V. 17. P. 1161–1171.
24. Carey C., Brown B., Cottingham K. The cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* increases the stability and network complexity of phytoplankton communities // *Ecosphere*. 2017. V. 8. e01830.

Blooming of Waterbodies: Ecological Aspects and Distribution of *Gloeotrichia Echinulata* in Lake Pleshcheyevo

Darya A. Tarasova¹ *

¹ Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

*tarasowadarja@gmail.com

Keywords phytoplankton, eutrophication, cyanobacteria, cyanotoxins, gloeotrichia

Abstract Lake Pleshcheyevo is a significant natural site serving as a drinking water source, recreational area, and protected territory. In recent years, signs of increasing eutrophication have been observed, and since 2017, a proliferation of the colonial cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata*—previously unrecorded in this ecosystem—has occurred. This article examines potential causes for the emergence of this species, including life cycle characteristics and feeding strategies of *G. echinulata*. Particular focus is given to its role as an ecosystem-modifying species and its potential toxicity. Analysis suggests that the *G. echinulata* outbreak serves as an indicator of profound ecological shifts within the lake. The necessity for continuous monitoring, environmental risk assessment, and development of an adaptive management strategy is emphasized.

Acknowledgements

The author expresses his gratitude to the mentors of the project, PhD Kuznetsova G.D., Associate Professor of the Department of Space Monitoring and Ecology of the MIIGAiK, and PhD Bratkov V.V., Head of the Department of Geography of the MIIGAiK, as well as a researcher at the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry of the Institute Biology of Inland Waters named after Papanina RAS to Tsvetkov A.I.

The research was carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage". The publication was carried out with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization <https://rgo.ru>