

СОСТОЯНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА И ЦИАНОТОКСИНЫ В ПЯТНЕ «ЦВЕТЕНИЯ» В ОЗЕРЕ СВЯТОЗЕРО (БАССЕЙН ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА, РОССИЯ)

Смирнова В. С., Теканова Е. В., Калинин Н. М., Чернова Е. Н.

PHYTOPLANKTON STATE AND CYANOTOXINS IN THE SVYATZERO LAKE BLOOM SPOT (ONEGA LAKE BASIN, RUSSIA)

Smirnova V. S., Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Chernova E. N.

Аннотация

Введение. Впервые выполнены исследования состояния фитопланктона в период «цветения» воды в эвтрофном озере Святозеро (61°32' с. ш., 33°35' в. д.), используемом для разведения форели, расположенном в республике Карелия Северо-Западного региона России. Для северных водоемов цветение воды не характерно. Однако в условиях потепления климата и масштабного развития форелеводства в регионе изучение «цветущих» водоемов и связанных с этим последствий для северных водных экосистем и человека становится актуальным. **Методы.** Обработка проб фитопланктона и измерение фотосинтеза проводились общепринятыми методами. Концентрацию хлорофилла *a* в воде определяли спектрофотометрически, содержание цианотоксинов оценено методом жидкостной хромато-масс-спектрометрии. **Результаты.** В сентябре 2019 г. в пятне цветения были изучены структурные, количественные и функциональные характеристики фитопланктона. Численность фитопланктона составила 198,712 млн кл./л, биомасса — 14,945 мг/л, концентрация хлорофилла *a* достигала 215,3 мкг/л, что соответствовало β-эвтрофному состоянию экосистемы в районе исследования. Выявлено, что 99,8 % биомассы и 96,7 % численности сообщества составляли цианобактерии. Доминантом сообщества (42 %) были виды рода *Microcystis*, которые являются известными потенциальными продуцентами цианобактериальных гепатотоксинов микроцистинов. Установлено присутствие микроцистинов, содержание которых в клеточной и внеклеточной фракциях было одинаковым и в сумме составляло 12,56 мкг/л. Идентифицировано 8 структурных вариантов микроцистинов, около 90 % в их суммарное содержание вносил [D-Asp³]MC-RR. Наиболее токсичный вариант MC-LR присутствовал в следовом количестве только в биомассе. По нормам Всемирной организации здравоохранения содержание микроцистинов и численность цианобактериальных клеток в пятне цветения в оз. Святозеро соответствует среднему уровню опасности при рекреационном использовании водоема и может представлять опасность для здоровья человека. **Заключение.** Необходимо контролировать состав фитопланктона, присутствие потенциально токсичных видов цианобактерий и цианотоксинов, а также состояние выращиваемой в оз. Святозеро форели, так как цианотоксины могут накапливаться в тканях рыб.

Ключевые слова: эвтрофирование, фитопланктон, цианобактерии, биогенные элементы, цианотоксины, микроцистины, Карелия, Россия.

Abstract

Introduction. This paper is the first to address the state of phytoplankton in eutrophic Svyatozero Lake (61°32' N, 33°35' E.), used for trout farming in the Republic of Karelia, in the North-Western Region of Russia, during the period of water bloom. For northern reservoirs, water bloom is not a typical phenomenon. However, due to climate warming and the large-scale development of trout breeding in the region, it becomes more urgent to study blooming reservoirs and related consequences for northern aquatic ecosystems and humans. **Methods.** We processed phytoplankton samples and measured photosynthesis using conventional methods. The concentration of chlorophyll *a* in water was determined spectrophotometrically, and the content of cyanotoxins was estimated by liquid chromatography-mass spectrometry. **Results.** In September 2019, we studied the structural, quantitative and functional characteristics of phytoplankton in the bloom spot. The phytoplankton abundance was 198.712 mln cells/l, the biomass was 14.945 mg/l, and the concentration of chlorophyll *a* reached 215.3 µg/l, which corresponded to the β-eutrophic state of the ecosystem in the study area. It was revealed that cyanobacteria corresponded to 99.8% of the biomass and 96.7% of the abundance. The species of the genus *Microcystis* were dominant (42%). They are well-known potential producers of cyanobacterial hepatotoxins, in particular, microcystins. We established the presence of microcystins. Their intracellular and extracellular concentrations were equal and in total amounted to 12.56 µg/l. We also identified eight structural variants of microcystins; among those, [D-Asp³] MC-RR accounted for up to 90% of the total content. The most toxic MC-LR variant was present in trace amounts only in biomass. According to the WHO standards, the content of microcystins and the number of cyanobacterial cells in the Svyatozero Lake bloom spot corresponds to average danger in the case of recreational use and can pose a threat to human health. **Conclusion.** It is necessary to monitor the phytoplankton composition, the presence of potentially toxic cyanobacterial species and cyanotoxins, as well as the state of trout farmed in the waters of Svyatozero Lake, since cyanotoxins can accumulate in fish tissues.

Keywords: eutrophication, phytoplankton, cyanobacteria, biogenic elements, cyanotoxins, microcystins, Karelia, Russia.

Введение

Массовое развитие сине-зеленых водорослей или «цветение» воды с образованием характерных пятен на поверхности водоема — хорошо известное и изученное явление. Цветение воды вызывается теплолюбивыми, нуждающимися в большом количестве биогенных веществ представителями родов *Microcystis*, *Planktothrix*, *Dolichospermum (Anabaena)*, *Aphanizomenon* [13] и приводит к уменьшению прозрачности воды, концентрации растворенного кислорода, «заморам» рыб, снижению и качества воды и рекреационных возможностей водоема. Кроме того, некоторые виды сине-зеленых водорослей выделяют опасные токсины для жизни и здоровья человека и животных [13, 16, 21, 25].

Среди цианобактериальных токсинов в пресноводных экосистемах наиболее распространены гепатотоксичные микроцистины (МС) [39], синтезируемые внутриклеточно, далее они попадают в водоемы посредством лизиса клеток после их гибели и/или физического стресса [35]. МС являются причиной отравления рыб, птиц и млекопитающих, включая домашних животных, и даже людей [37]. В результате употребления загрязненной воды, морепродуктов, рыбы и пищевых добавок токсины попадают в организм человека.

Цветение воды — обычное явление в эвтрофных озерах южных и средних широт. В северных водах массовое размножение цианобактерий встречается значительно реже и бывает вызвано либо высокой антропогенной фосфорной нагрузкой на озеро, либо аномально теплой безветренной погодой. На территории Карелии региональные геохимические факторы формирования биопродуктивности водоемов во многом ограничивают увеличение продуктивности биоты, в том числе и массовое развитие цианобактерий, вследствие чего преобладают олиготрофные и слабomezотрофные озера [18]. Эвтрофирование водоемов Карелии, как правило, является следствием хозяйственной деятельности человека [10, 17].

Исследование состояния фитопланктонного сообщества и токсинов цианобактерий во время цветения воды в водоемах Карелии до сих пор не проводилось. Тем не менее, изучение этого явления и его последствий представляется

важным и своевременным, так как в настоящее время расширяется перечень факторов, стимулирующих массовое развитие сине-зеленых водорослей. К фосфорной нагрузке на водоемы от сточных вод и сельскохозяйственных территорий добавляется фосфор, поступающий от форелевых ферм, количество которых в Карелии за последние 20 лет только увеличивается. Кроме того, потепление регионального климата приводит к увеличению как температуры воды и продолжительности биологического лета в водоемах Карелии [20], так и поступлению фосфора в водоемы в составе гумусовых веществ с речным стоком [5, 6].

Целью работы было изучение структурных, количественных и функциональных характеристик альгоценоза в «пятне цветения» на оз. Святозеро и выявление токсинов в воде и в клетках микроводорослей.

Методы и материалы

Озеро Святозеро (61°32′ с. ш., 33°35′ в. д.) расположено в средней части водосбора р. Шуи — второго по величине притока Онежского озера. Площадь зеркала озера составляет 9,9 км², средняя глубина — 6,8 м, наибольшая — 17,2 м, период условного водообмена — 4,21 года. Святозеро — олигогумусное, маломинерализованное, гидрокарбонатного класса группы Са, эвтрофное озеро со средней прозрачностью воды 3 м. В водоем до 2000-х гг. попадали стоки зверофермы и фермы крупного рогатого скота, в настоящее время озеро используется для товарного форелеводства, любительского рыболовства, для нужд местного населения [19].

Пробы воды были взяты в северной части озера в прибрежном пятне цветения в сентябре 2019 года (рис. 1). Отмечался запах гниющей растительности, прозрачность составляла 0,5 м, температура воды — 19 °С.

Обработка проб фитопланктона проводилась общепринятыми методами [12]. Ценотическую структуру альгоценозов оценивали по индексу разнообразия Шеннона–Уивера. К ультрапланктонной фракции отнесены водоросли размером <10 мкм, к нанопланктонной фракции фитопланктона — размером 10–30 мкм, а более крупные водоросли — к микропланктонной [11].

Фотосинтез измерялся скляночным кислородным методом [9]. При пересчете данных с еди-

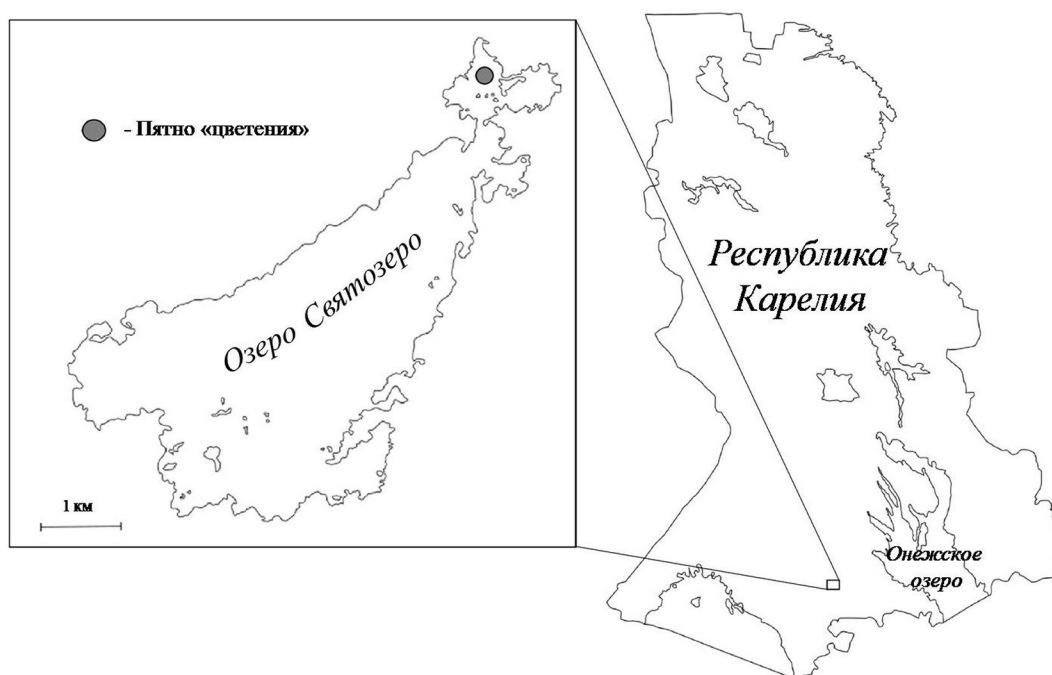


Рис. 1. Карта-схема места отбора проб в оз. Святозеро

ниц кислорода в углерод использовался ассимиляционный коэффициент 1,25. При расчете Р/В коэффициента принималось, что содержание углерода в сырой биомассе фитопланктона составляет 10 %. Концентрацию в воде хлорофилла *a* определяли спектрофотометрически [3].

Для определения профиля цианобактериальных токсинов и их количественного содержания использовался метод высокоэффективной жидкостной хроматографии — масс-спектрометрии высокого разрешения (ВЭЖХ–МС–ВР). Для определения внеклеточных и внутриклеточных микроцистинов предварительно пробу воды разделяли посредством фильтрования на мембранных фильтрах «Владипор» ($D_{\text{пор}}$ 0,8 мкм) на фильтрат, содержащий внеклеточную фракцию микроцистинов, и биомассу фитопланктона, содержащую внутриклеточную фракцию. Для подготовки проб к анализу использовали твердофазную экстракцию (Oasis HLB, Waters) для образцов воды и обработку 75 % метанолом в ультразвуковой ванне для собранных образцов биомассы на фильтрах.

Анализ выполняли с использованием системы ВЭЖХ Prominence LC-20 (Shimadzu, Япония) в сочетании с масс-спектрометром LTQ Orbitrap XL (Thermo Fisher Scientific, США). Разделение

токсинов проводили на колонке Thermo Hypersil Gold RP C18 (100 × 3 мм, 3 мкм, Thermo Fisher Scientific) в режиме градиентного элюирования (0,2 мл/мин) смесью воды и ацетонитрила, содержащих 0,05 % муравьиной кислоты. Масс-спектрометрический анализ цианотоксинов проводили в условиях электрораспылительной ионизации в режиме детектирования положительных ионов. Целевые соединения идентифицировали на основании точного измерения массы ионов $[M + H]^+$ или $[M + 2H]^{2+}$ (разрешение 30 000, точность в пределах 5 ppm) [26], данных из спектров фрагментации [24] и хроматографических времен удерживания. Количественное определение проводили методом внутреннего и внешнего стандартов. Изотопно меченная по углероду натриевая соль диклофенака хеми (нонагидрата) ($^{13}C_6C_8H_{10}Cl_2NNaO_2 \cdot 4,5H_2O$, Vetranal) использовалась в качестве внутреннего стандарта и вводилась в образец перед экстракцией. С использованием растворов 9 стандартных соединений микроцистинов (MC-LR, MC-RR, MC-YR (SigmaAldrich), а также MC-LY, MC-LA, MC-LW, MC-LF, [D-Asp³] MC-LR и [D-Asp³] MC-RR (Enzo Life Sciences, Inc., США) были построены калибровочные зависимости в диапазоне

от 2 до 500 нг/мл, которые использовались в качестве внешних стандартов.

Были использованы следующие реактивы: Ацетонитрил (Криохром, сорт «0»), метанол (Li Chrosolvhypergrade для LC–MS, Merck, Германия), муравьиная кислота (98–100 %, Fluka Chemika, Buchs, Швейцария), а также вода, очищенная с помощью системы Direct-Q (Millipore, электропроводность 0,056 $\mu\text{S}/\text{см}$ при 25 °С) (Массачусетс, США).

Результаты исследования и обсуждение

Первые фрагментарные исследования фитопланктона оз. Святозеро были выполнены в 1950-е гг., и они указывали на эвтрофное состояние его экосистемы [1]. В тот период Святозеро подвергалось сильному антропогенному воздействию и являлось одним из самых загрязненных водоемов Карелии. Периодическое цветение воды в озере отмечалось с 1980-х годов [14].

В период с 1994 по 2013 г. были получены более подробные сведения о количественных, структурных и видовых характеристиках и доминирующих видах фитопланктона оз. Святозеро (табл. 1). Количество обнаруженных таксонов рангом ниже рода варьировалось от 16 до 64. Доминировали в альгоценозах диатомовые (29–63 %), динофитовые (26–51 %), сине-зеленые (1,5–20,0 %) водоросли. В 1994 г., видимо, в связи со снижением антропогенной нагрузки после разрушения животноводства и звероводства, средняя биомасса фитопланктона соответс-

твовала олиготрофному состоянию экосистемы. С 2000–х гг. биомасса достигала показателей мезотрофных водоемов. Этому способствовало развитие товарного рыбоводства и, вероятно, наличие внутренней фосфорной нагрузки.

Предпосылками внутренней фосфорной нагрузки на экосистему Святозера служат: 1) высокие концентрации общего (33–70 мкг/л) и минерального (16–29 мкг/л) фосфора в воде с 1960 по 2006 г. [2, 4, 14, 15]; 2) накопление общего фосфора в донных отложениях (0,5 %) [7]; 3) дефицит кислорода в придонных слоях воды (около 50–70 %) [14, 15]. Концентрации общего фосфора в воде оз. Святозеро с 1960 по 2006 г. не опускались ниже средних значений по водоему в разные годы, минерального — 16–29 мкг/л, подтверждая эвтрофное состояние экосистемы [8].

В сентябре 2019 г. в пятне цветения в составе фитопланктона выявлено 17 видов водорослей. Доминантными видами являлись *Microcystis wesenbergii* (Komarek, 1968), *Microcystis aeruginosa* (Kützing, 1846), *Woronichinia naegeliana* (Unger, Elenkin, 1933), *Microcystis ichthyoblabe* (Kützing, 1843), *Microcystis flos-aquae* (Wittrock, Kirchner, 1898). Преобладание видов рода *Microcystis* (42 %) нехарактерно для сообщества фитопланктона оз. Святозеро. В целом фитоценоз характеризовался высокой степенью видового разнообразия (индекс Шеннона 2,8), однако 99,8 % общей биомассы и 96,7 % общей численности сообщества были представлены циано-

Таблица 1

Количественные и структурные показатели фитопланктона в оз. Святозеро в летний период 1994–2013 годов

Год	Средняя численность, тыс. кл./л	Средняя биомасса, мг/л	Массовые виды и роды	Источники
1994	430	0,8	<i>Aulacoseira</i> , <i>Melosira</i> u <i>Cyclotella</i> , <i>Trachelomonas volvocina</i> (Ehrenberg, 1834)	[22]
2006	315	1,575	<i>Fragilaria crotonensis</i> (Kitton, 1869), <i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller, Simonsen, 1979), <i>Aulacoseira italica var. tenuissima</i> (Grunow, Simonsen, 1979), <i>Stephanodiscus astraea</i> (Ehrenberg, Grunow, 1880), <i>Staurastrum oxyacanthum</i> (W. Archer, 1860), <i>Scenedesmus arcuatus</i> (Lemmermann, 1899), <i>Chroococcus turgidus</i> (Kützing, Nageli, 1849) (= <i>Gloeocapsa turgida</i> (Kützing, Hollerb), <i>Ceratium hirundinella</i> (O. F. Müller, Schrank, 1793)	[4]
2013	1 365	1,435	<i>Aulacoseira</i> , <i>Tabellaria</i> , <i>Fragilaria</i> , <i>Cyclotella</i> , <i>Cosmarium</i> , <i>Elakatotrix</i> , <i>Monoraphidium</i> , <i>Chrysococcus</i> , <i>Kephyrion</i> , <i>Mallomonas</i> , <i>Ceratium</i> , <i>Peridinium</i> , <i>Peridiniopsis</i> , <i>Chroomonas</i> , <i>Cryptomonas</i> , <i>Rhodomonas</i> , <i>Trachelomonas</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Microcystis</i> , <i>Snowella</i> , <i>Woronichinia</i>	[23]

бактериями. Такая моноструктура альгоценоза свойственна только для пятен цветения, обычно доля цианобактерий в фитопланктоне Святозера не превышает 20 % [4, 22, 23]. Размерная структура фитопланктона тоже отличалась однообразием. Практически все обнаруженные виды относились к ультрафитопланктону. Представителем микрофитопланктона был только один более крупный вид диатомовых водорослей *Asterionella formosa var. formosa* (Hassall, 1850).

Общая численность фитопланктона в пятне цветения составила 198,712 млн кл./л, а общая биомасса — 14,945 мг/л. Концентрация хлорофилла *a* в пятне цветения достигала 215,3 мкг/л, а его содержание в биомассе — 1,4 %. Эти показатели указывали на β-эвтрофное состояние экосистемы в районе исследования [8]. В то же время скорость фотосинтеза в сообществе составляла 1,0 мг O₂/л сут или 0,320 мг C/сут, достигая лишь уровня мезотрофных вод. При соотношении ее с чрезвычайно высокими величинами биомассы и хлорофилла *a* показатели удельного фотосинтеза оказались ничтожно малы — суточное ассимиляционное число 1,5 мкг C/мкг Chl, P/V коэффициент 0,2 сут⁻¹. Минимальная функциональная активность свидетельствует о деградации сообщества и отмирании клеток.

До настоящего времени появляется противоречивая информация о предпочтении фосфора или азота для роста и развития цианобактерий, а также для производства опасного токсина микроцистина [41]. Однозначно подтверждается лишь то, что повышенная нагрузка питательными веществами в целом увеличивает биомассу и риск цветения цианобактерий и, следовательно, риск производства микроцистина. Краткосрочные изменения в доступности азота и фосфора могут влиять на состав цианобактерий или проявление токсичности [34, 38, 42]. Например, при недостатке азота получают преимущество азотфиксирующие виды *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Nostoc* и др. В работе [29] показано, что из исследованных факторов окружающей среды с биомассой *M. aeruginosa* сильнее всего коррелировал именно общий фосфор. А из публикации [33] известно, что одновременное повышение температуры и концентрации фосфора приводило к самым высоким темпам роста токсичных клеток *Microcystis* в большинстве экспериментов.

В пятне цветения в оз. Святозеро доминантами были виды из рода *Microcystis*, поэтому можно предположить, что именно большое количество фосфора могло вызвать бурное развитие данных видов водорослей и что фосфорная нагрузка и потепление климата в будущем могут дополнительно способствовать росту популяций токсичных *Microcystis*.

В исследованных пробах установлено присутствие микроцистинов, суммарное содержание которых в биомассе и в воде составляло 12,56 мкг/л, причем вклад внеклеточной фракции (в пробах отфильтрованной воды) составлял 6,22 мкг/л или 50 % от общего содержания, что указывает на интенсивно происходящий лизис клеток в момент исследований. Эти результаты подтверждают данные об отсутствии функциональной активности и деградации сообщества.

В настоящее время описано более 250 вариантов микроцистинов [32], причем структура соединения влияет на их токсичность [31]. В связи с этим целесообразно проводить идентификацию присутствующих структурных вариантов микроцистинов в пробе.

В исследованных пробах идентифицировано 8 структурных вариантов микроцистинов, содержащих в своей структуре аргинин (табл. 2). Из них два варианта обнаружены только в клеточной фракции, в том числе наиболее токсичный вариант MC-LR, который присутствовал в следовом количестве. В обе фракции максимальный вклад вносил [D-Asp³]MC-RR, составляя от 89 до 95 % суммарного содержания. Для детектированных вариантов согласно данным токсикологических исследований установленная летальная доза LD₅₀ (мыши, внутрибрюшинное введение) составляет для MC-LR 50 мкг/кг, а для [D-Asp³]MC-RR — 180–250 мкг/кг [40]. Продуцентами детектированных вариантов микроцистинов могут быть виды рода *Microcystis*, а именно *M. aeruginosa* и *M. viridis* (A. Braun, Lemmermann, 1903) [28], которые в это время присутствовали в фитопланктоне.

В случае рекреационного использования водоема, согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), раздражающее или аллергическое действие, вызванное присутствием цианобактериальных метаболитов, может возникнуть при превышении допустимого уровня

ня 20 000 цианобактериальных клеток на 1 мл. Данная концентрация соответствует 10 мкг хлорофилла *a* на литр и 2–4 мкг/л микроцистинов в условиях преобладания цианобактерий. Скопление 100 000 цианобактериальных клеток на 1 мл эквивалентно 50 мкг хлорофилла *a* на литр и до 20 мкг/л микроцистинов при доминировании цианобактерий представляет собой ориентировочное значение для уровня средней опасности и возможном влиянии на здоровье человека.

Наивысший риск неблагоприятных последствий для здоровья возникает в случае наличия пятен цветения в местах для плавания [43]. Предельно допустимое содержание наиболее изученного варианта микроцистина MC-LR для питьевой воды по рекомендации ВОЗ составляет 1 мкг/л [44]. В то же время в некоторых странах предлагают нормировать суммарное содержание микроцистинов, поскольку все варианты токсичные [27].

В соответствии с нормами ВОЗ обнаруженное в оз. Святозеро в пятне цветения суммарное количество микроцистинов и концентрация цианобактериальных клеток соответствуют среднему уровню опасности при рекреационном использовании водоемов, при котором возможно влияние этих токсинов на здоровье человека.

Особое внимание необходимо уделять присутствию потенциально токсичных видов цианобактерий в рыбоводческих водоемах, таких как оз. Святозеро, где находится форелевое хозяйство. Воздействие цианобактерий и их токсинов

на рыб осуществляется по трофической цепи при поедании прокариотических клеток или других организмов (например, зоопланктона), которые накопили цианотоксины, а также через прямой контакт жаберного эпителия с окружающей загрязненной водой [36]. Такое воздействие может повлиять на рост рыб, их развитие, воспроизводство и выживание [30, 36]. Кроме того, установлено, что микроцистины аккумулируются в тканях рыб [45], то есть чем больше возраст рыбы, тем больше токсинов в тканях она может накопить.

Заключение

Озеро Святозеро с 50-х годов прошлого столетия подвергалось значительной антропогенной нагрузке, что привело к эвтрофированию водоема и периодическому цветению воды. Количественные показатели развития фитопланктона, концентрация хлорофилла *a* в воде в месте цветения в сентябре 2019 года соответствовали β-эвтрофному состоянию экосистемы. Функциональная активность сообщества по показателям удельного фотосинтеза была минимальной, что свидетельствовало о его деградации. Фитоценоз в пятне цветения был представлен почти исключительно цианобактериями. Видовым доминантом сообщества были виды рода *Microcystis*, которые являются продуцентами гепатотоксичных микроцистинов.

По классификации ВОЗ суммарная концентрация микроцистинов и количество клеток цианобактерий в озерной воде достигали среднего

Таблица 2

Детектированные варианты структур микроцистинов и их содержание в воде и фитопланктоне из пятна цветения в оз. Святозеро в сентябре 2019 года

Образец	Детектированный структурный вариант микроцистина	Концентрация, мкг/л	Суммарное содержание микроцистинов, мкг/л
Фильтрат (внеклеточная фракция цианотоксинов)	[D-Asp ³]MC-LR	0,109	6,22
	[ADMAAdda ⁵]MC-LR	0,006	
	[D-Asp ³]MC-RR	5,980	
	[D-Asp ³]MC-YR	0,025	
	MC-RR	0,091	
	MC-YR	0,004	
Биомасса фитопланктона (внутриклеточная фракция цианотоксинов)	[D-Asp ³]MC-LR	0,261	6,34
	MC-LR	0,006	
	[D-Asp ³ Dha ⁷]MC-RR	0,152	
	[ADMAAdda ⁵]MC-LR	0,002	
	[D-Asp ³]MC-RR	5,660	
	[D-Asp ³]MC-YR	0,005	
	MC-RR	0,210	
MC-YR	0,047		

уровня опасности для водоемов рекреационного использования, что говорит о наличии опасности для здоровья человека. Одинаковое содержание микроцистинов в клеточной (биомасса фитопланктона) и внеклеточной (вода) фракциях указывало на активный лизис клеток. Идентифицировано 8 структурных вариантов микроцистинов, при этом от 89 до 95 % суммарного содержания составлял вариант [D-Asp³]MC-RR. Наиболее токсичный вариант MC-LR присутствовал только в клеточной фракции в следовом количестве.

Периодическое цветение воды и обнаружение больших концентраций микроцистинов в оз. Святозеро — водоеме рекреационного назначения и объекте рыбоводства — представляет серьезную проблему, связанную с риском для здоровья как товарной и дикой рыбы, так и человека. На фоне потепления климата и увеличения температуры воды и продолжительности биологического лета, видимо, следует ожидать более частых и более масштабных эпизодов цветения воды в оз. Святозеро. Еще одним негативным последствием цветения воды является значительное потребление кислорода при бактериальном разложении больших биомасс водорослей, что ведет к «заморам» рыб, а также к увеличению внутренней фосфорной нагрузки и усилению процесса эвтрофирования оз. Святозеро. В связи с этим необходим контроль за состоянием как экосистемы водоема, так и выращиваемой в оз. Святозеро форели, так как цианотоксины могут накапливаться в тканях рыб.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания (50 %) Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, а также частично (50 %) с использованием средств государственного бюджета по госзаданию № АААА-А19-119020190099-1 ФГБУН «Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН.

Авторы выражают благодарность А. П. Георгиеву за помощь в сборе материала для статьи.

Литература

1. Александров, Б. М., Беляева, К. И., Покровский, В. В., Стефановская, А. Ф. и Урбан, В. В. (1959). Оз. Святозеро.

Озера Карелии. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, сс. 211–225.

2. Баранов, И. В. (1962). Лимнологические типы озер СССР. Л.: Гидрометеиздат, 276 с.

3. Госкомитет СССР по охране природы (1990). ГОСТ 17.1.4.02–90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: Издательство стандартов.

4. Ильмаст, Н. В., Китаев, С. П., Кучко, Я. А. и Павловский, С. А. (2008). Гидроэкология разнотипных озер южной Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 92 с.

5. Калинин, Н. М., Теканова, Е. В., Сабылина, А. В. и Рыжаков, А. В. (2019). Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов. Известия Российской академии наук. Серия географическая, № 1, сс. 62–72. DOI: 10.31857/S2587-55662019162-72.

6. Калинин, Н. М., Филатов, Н. Н., Теканова, Е. В. и Балаганский, А. Ф. (2018). Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений. Региональная экология, № 2 (52), сс. 65–73. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73.

7. Калмыков, М. В. (1998). Водоемы среднего участка реки Шуи и озеро Ведлозеро. Химический состав донных отложений. В: Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, сс. 146–148.

8. Китаев, С. П. (2007). Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 395 с.

9. Кузнецов, С. И. и Дубинина, Г. А. (1989). Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 285 с.

10. Лозовик, П. А., Сабылина, А. В. и Рыжаков, А. В. (2013). Химический состав озерных вод. В: Филатов, Н. Н. и Кухарев, В. И. (ред.) Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: КарНЦ РАН, сс. 30–37.

11. Михеева, Т. М., Остапеня, А. П., Ковалевская, Р. З. и Лукьянова, Е. В. (1998). Пико- и нанопланктон пресноводных экосистем. Минск: Белгосуниверситет, 196 с.

12. Мордухай-Болтовской, Ф. Д. (ред.) (1975). Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 240 с.

13. Русских, Я. В., Чернова, Е. Н., Воякина, Е. Ю., Никифоров, В. А. и Жаковская, З. А. (2012). Определение цианотоксинов в водной матрице методом высокоэффективной жидкостной хроматографии — масс-спектрометрии высокого разрешения. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), № 17 (43), сс. 61–66.

14. Сабылина, А. В. (1991). Святозерская группа озер. В: Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, сс. 72–80.

15. Сабылина, А. В., Мартынова, Н. Н. и Басов, М. И. (1998). Водоемы среднего участка реки Шуи и озеро Ведлозеро. Химический состав воды. В: Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, сс. 139–145.

16. Степанова, Н. Ю., Халиуллина, Л. Ю., Никитин, О. В. и Латыпова, В. З. (2012). Структура и токсичность

цианобактерий в рекреационных зонах водоемов Казанского региона. Вода: химия и экология, № 11 (53), сс. 67–72.

17. Теканова, Е. В. (2013). Первичная продукция. В: Филатов, Н. Н. и Кухарев, В. И. (ред.) Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: КарНЦ РАН, сс. 49–51.

18. Теканова, Е. В., Калинкина, Н. М. и Кравченко, И. Ю. (2018). Геохимические особенности функционирования биоты в водоемах Карелии. Известия Российской академии наук. Серия географическая, № 1, сс. 90–100. DOI: 10.7868/S2587556618010083.

19. Филатов, Н. Н. и Кухарев, В. И. (ред.) (2013). Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 464 с.

20. Филатов, Н. Н., Руховец, Л. А., Назарова, Л. Е., Георгиев, А. П., Ефремова, Т. В. и Пальшин, Н. И. (2014). Влияние изменений климата на экосистемы озер севера Европейской территории России. Ученые записки, № 34, сс. 48–55.

21. Хендерсон-Селлерс, Б. и Маркленд, Х. Р. (1990). Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 278 с.

22. Чекрыжева, Т. А. (1998). Водоемы среднего участка реки Шуи и озеро Ведлозеро. Фитопланктон. В: Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, сс. 148–150.

23. Чекрыжева, Т. А. и Рыжков, Л. П. (2014). Экологическое состояние оз. Святозеро по фитопланктону. В: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием, 23–27 июня 2014 г. Часть 2. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, сс. 243–247.

24. Чернова, Е. Н., Русских, Я. В., Подольская, Е. П. и Жаковская, З. А. (2016). Определение микроцистинов и анатоксина-а методом жидкостной хромато-масс-спектрометрии низкого разрешения. Научное приборостроение, Т. 26, № 1, сс. 11–25.

25. Belykh, O. I., Gladkikh, A. S., Sorokovikova, E. G., Tikhonova, I. V., Potapov, S. A. and Fedorova, G. A. (2013). Microcystin-producing cyanobacteria in water reservoirs of Russia, Belarus and Ukraine. *Chemistry for Sustainable Development*, Vol. 21, No. 4, pp. 347–361.

26. Chernova, E., Russkikh, I., Voyakina, E. and Zhakovskaya, Z. (2016). Occurrence of microcystins and anatoxin-a in eutrophic lakes of Saint Petersburg, Northwestern Russia. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, Vol. 45, Issue 4, pp. 466–484. DOI: 10.1515/ohs-2016-0040.

27. Chorus, I. (2012). *Current approaches to cyanotoxin risk assessment, risk management and regulations in different countries*. Dessau-Roßlau: Federal Environment Agency, 147 p.

28. Chorus, I. and Bartram, J. (eds.) (1999). *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. London: Routledge, 432 p.

29. Davis, T. W., Berry D. L., Boyer G. L. and Gobler C. J. (2009). The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms. *Harmful Algae*, Vol. 8, Issue 5, pp. 715–725. DOI: 10.1016/j.hal.2009.02.004.

30. Drobac, D., Tokodi, N., Lujčić, J., Marinović, Z., Subakov-Simić, G., Dulić, T., Važić, T., Nybom, S., Meriluoto, J., Codd,

G. A. and Svirčev, Z. (2016). Cyanobacteria and cyanotoxins in fishponds and their effects on fish tissue. *Harmful Algae*, Vol. 55, pp. 66–76. DOI: 10.1016/j.hal.2016.02.007.

31. Feurstein, D., Stemmer, K., Kleinteich, J., Speicher, T. and Dietrich, D. R. (2011). Microcystin congener- and concentration-dependent induction of murine neuron apoptosis and neurite degeneration. *Toxicological Sciences*, Vol. 124, Issue 2, pp. 424–431. DOI: 10.1093/toxsci/kfr243.

32. Huisman, J., Codd, G. A., Paerl, H. W., Ibelings, B. W., Verspagen, J. M. H. and Visser, P. M. (2018). Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, Vol. 16, No. 8, pp. 471–483. DOI: 10.1038/s41579-018-0040-1.

33. Kotak, B. G., Lam, A. K.-Y., Prepas, E. E. and Hruday, S. E. (2000). Role of chemical and physical variables in regulating microcystin-LR concentration in phytoplankton of eutrophic lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 57, Issue 8, pp. 1584–1593. DOI: 10.1139/f00-091.

34. Krüger, T., Hölzel, N. and Luckas, B. (2012). Influence of cultivation parameters on growth and microcystin production of *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae) isolated from Lake Chao (China). *Microbial Ecology*, Vol. 63, Issue 1, pp. 199–209. DOI: 10.1007/s00248-011-9899-3.

35. Li, J., Li, R. and Li, J. (2017). Current research scenario for microcystins biodegradation — A review on fundamental knowledge, application prospects and challenges. *Science of the Total Environment*, Vol. 595, pp. 615–632. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.285.

36. Malbrouck, C. and Kestemont, P. (2006). Effects of microcystins on fish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 25, Issue 1, pp. 72–86. DOI: 10.1897/05-029R.1.

37. Massey, I. Y., Yang, F., Ding, Z., Yang, S., Guo, J., Tezi, C., Al-Osman, M., Kamegni, R. B. and Zeng, W. (2018). Exposure routes and health effects of microcystins on animals and humans: A mini-review. *Toxicol*, Vol. 151, pp. 156–162. DOI: 10.1016/j.toxicol.2018.07.010.

38. Oh, H.-M., Lee, S. J., Jang, M.-H. and Yoon, B.-D. (2000). Microcystin production by *Microcystis aeruginosa* in a phosphorus-limited chemostat. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 66, Issue 1, pp. 176–179. DOI: 10.1128/aem.66.1.176-179.2000.

39. Paerl, H. W., Hall, N. S. and Calandrino, E. S. (2011). Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change. *Science of the Total Environment*, Vol. 409, Issue 10, pp. 1739–1745. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.02.001.

40. Sivonen, K. and Jones, G. (1999). Cyanobacterial toxins. In: Chorus, I. and Bartram, J. (eds.) *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. London: Routledge, pp. 41–111.

41. Srivastava, A., Choi, G.-G., Ahn, C.-Y., Oh, H.-M., Ravi, A. K. and Asthana, R. K. (2012). Dynamics of microcystin production and quantification of potentially toxigenic *Microcystis* sp. using real-time PCR. *Water Research*, Vol. 46, Issue 3, pp. 817–827. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.056.

42. Vézic, C., Rapala, J., Vaitomaa, J., Seitsonen, J. and Sivonen, K. (2002). Effect of nitrogen and phosphorus on growth of toxic and nontoxic *Microcystis* strains and on intracellular microcystin concentrations. *Microbial Ecology*, Vol. 43, Issue 4, pp. 443–454. DOI: 10.1007/s00248-001-0041-9.

43. WHO (2003). *Guidelines for safe recreational water environments. Vol. 1. Coastal and fresh waters*. Geneva: WHO, 219 p.

44. WHO (2017). *Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum*. Geneva: WHO, 541 p.

45. Zhang, D., Xie, P., Liu, Y. and Qiu, T. (2009). Transfer, distribution and bioaccumulation of microcystins in the aquatic food web in Lake Taihu, China, with potential risks to human health. *Science of the Total Environment*, Vol. 407, Issue 7, pp. 2191–2199. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.12.039.

References

1. Aleksandrov, B. M., Belyaeva, K. I., Pokrovsky, V. V., Stefanovskaya, A. F. and Urban, V. V. (1959). *Svyatozero Lake. Lakes of Karelia*. Petrozavodsk: State Publishing House of the Karelian ASSR, pp. 211–225.

2. Baranov, I. V. (1962). *Limnological types of lakes in the USSR*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 276 p.

3. USSR State Committee for Environment Protection (1990). *State Standard GOST 17.1.4.02-90. Water. Spectrophotometric determination of chlorophyll a*. Moscow: Izdatelstvo Standartov.

4. Ilmast, N. V., Kitayev, S. P., Kuchko, Ya. A. and Pavlovsky, S. A. (2008). *Hydroecology of different types of lakes in southern Karelia*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 92 p.

5. Kalinkina, N. M., Tekanova, E. V., Sabylina, A. V. and Ryzhakov, A. V. (2019). Changes in the hydrochemical regime of Onego Lake since the early 1990s. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, No. 1, pp. 62–72. DOI: 10.31857/S2587-55662019162-72.

6. Kalinkina, N. M., Filatov, N. N., Tekanova, E. V. and Balaganskii, A. F. (2018). Long-term dynamics of iron and phosphorus runoff into Onego Lake with Shuya River under climate change conditions. *Regional Ecology*, No. 2 (52), pp. 65–73. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73.

7. Kalmykov, M. V. (1998). Reservoirs of the middle section of the Shuya River and Vedlozero Lake. Chemical composition of bottom sediments. In: *Current state of water bodies in the Republic of Karelia. Based on the results of monitoring in 1992–1997*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 146–148.

8. Kitayev, S. P. (2007). *Basic general limnology for hydrobiologists and ichthyologists*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 395 p.

9. Kuznetsov, S. I. and Dubinina, G. A. (1989). *Methods for studying aquatic microorganisms*. Moscow: Nauka, 285 p.

10. Lozovik, P. A., Sabylina, A. V. and Ryzhakov, A. V. (2013). Chemical composition of lake waters. In: Filatov, N. N. and Kukharev, V. I. (eds.). *Lakes of Karelia. Reference book*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 30–37.

11. Mikheyeva, T. M., Ostapenya, A. P., Kovalevskaya, R. Z. and Lukyanova, Ye. V. (1998). *Pico- and nanophytoplankton of freshwater ecosystems*. Minsk: Belarusian State University, 196 p.

12. Mordukhay-Boltovskoy, F. D. (ed.) (1975). *Method for studying biogeocenoses of inland water bodies*. Moscow: Nauka, 240 p.

13. Russkikh, Ya., Chernova, E., Voyakina, E., Nikiforov, V. and Zhakovskaya, Z. (2012). Determination of cyanotoxin in natural water samples by high performance liquid

chromatography — high resolution mass-spectrometry. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, No. 17 (43), pp. 061–066.

14. Sabylina, A. V. (1991). Svyatozero group of lakes. In: *Surface waters of the Shuya lake-river system under conditions of anthropogenic impact*. Petrozavodsk: Karelia, pp. 72–80.

15. Sabylina, A. V., Martynova, N. N. and Basov, M. I. (1998). Reservoirs of the middle section of the Shuya River and Vedlozero Lake. Chemical composition of water. In: *Current state of water bodies in the Republic of Karelia. Based on the results of monitoring in 1992–1997*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 139–145.

16. Stepanova, N. Yu., Khaliullina, L. Yu., Nikitin, O. V. and Latypova, V. Z. (2012). The structure and toxicity of cyanobacteria in the recreational zones of water bodies in Kazan region. *Water: Chemistry and Ecology*, No. 11 (53), pp. 67–72.

17. Tekanova, Ye. V. (2013). Primary production. In: Filatov, N. N. and Kukharev, V. I. (eds.). *Lakes of Karelia. Reference Book*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 49–51.

18. Tekanova, E. V., Kalinkina, N. M. and Kravchenko, I. Yu. (2018). Geochemical peculiarities of biota functioning in water bodies of Karelia. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya* No. 1, pp. 90–100. DOI: 10.7868/S2587556618010083

19. Filatov, N. N. and Kukharev, V. I. (eds.) (2013). *Lakes of Karelia. Reference book*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 464 p.

20. Filatov, N. N., Rukhovets, L. A., Nazarova, L. E., Georgiev, A. P., Ephraim, T. V. and Pal'shin, N. I. (2014). Climate change impacts on the ecosystem of lake north of European Russia. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, No. 34, pp. 48–55.

21. Henderson-Sellers, B. and Markland, H. R. (1990). *Decaying lakes. The origin and control of cultural eutrophication*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 278 p.

22. Chekryzheva, T. A. (1998). Reservoirs of the middle section of the Shuya River and Vedlozero Lake. Phytoplankton. In: *Current state of water bodies in the Republic of Karelia. Based on the results of monitoring in 1992–1997*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 148–150.

23. Chekryzheva, T. A. and Ryzhkov, L. P. (2014). Environmental status of Lake Svyatozero based on phytoplankton studies. In: *Ecological Problems of Northern Regions and Ways for Their Solution. Materials of the V All-Russian Scientific Conference with Foreign Participation, June 23–27, 2014. Part 2*. Apatity: Publishing Office of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 243–247.

24. Chernova, E. N., Russkikh, Y. V., Podolskaya, E. P. and Zhakovskaya, Z. A. (2016). Determination of microcystins and anatoxin-a using liquid chromat-mass-spectrometry of unit resolution. *Nauchnoe Priborostroenie*, Vol. 6, No. 1, pp. 11–25.

25. Belykh, O. I., Gladkikh, A. S., Sorokovikova, E. G., Tikhonova, I. V., Potapov, S. A. and Fedorova, G. A. (2013). Microcystin-producing cyanobacteria in water reservoirs of Russia, Belarus and Ukraine. *Chemistry for Sustainable Development*, Vol. 21, No. 4, pp. 347–361.

26. Chernova, E., Russkikh, I., Voyakina, E. and Zhakovskaya, Z. (2016). Occurrence of microcystins and anatoxin-a in eutrophic lakes of Saint Petersburg, Northwestern

Russia. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, Vol. 45, Issue 4, pp. 466–484. DOI: 10.1515/ohs-2016-0040.

27. Chorus, I. (2012). *Current approaches to cyanotoxin risk assessment, risk management and regulations in different countries*. Dessau-Roßlau: Federal Environment Agency, 147 p.

28. Chorus, I. and Bartram, J. (eds.) (1999). *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. London: Routledge, 432 p.

29. Davis, T. W., Berry D. L., Boyer G. L. and Gobler C. J. (2009). The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms. *Harmful Algae*, Vol. 8, Issue 5, pp. 715–725. DOI: 10.1016/j.hal.2009.02.004.

30. Drobac, D., Tokodi, N., Lujčić, J., Marinović, Z., Subakov-Simić, G., Dulić, T., Važić, T., Nybom, S., Meriluoto, J., Codd, G. A. and Svirčev, Z. (2016). Cyanobacteria and cyanotoxins in fishponds and their effects on fish tissue. *Harmful Algae*, Vol. 55, pp. 66–76. DOI: 10.1016/j.hal.2016.02.007.

31. Feurstein, D., Stemmer, K., Kleinteich, J., Speicher, T. and Dietrich, D. R. (2011). Microcystin congener- and concentration-dependent induction of murine neuron apoptosis and neurite degeneration. *Toxicological Sciences*, Vol. 124, Issue 2, pp. 424–431. DOI: 10.1093/toxsci/kfr243.

32. Huisman, J., Codd, G. A., Paerl, H. W., Ibelings, B. W., Verspagen, J. M. H. and Visser, P. M. (2018). Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, Vol. 16, No. 8, pp. 471–483. DOI: 10.1038/s41579-018-0040-1.

33. Kotak, B. G., Lam, A. K.-Y., Prepas, E. E. and Hrudevy, S. E. (2000). Role of chemical and physical variables in regulating microcystin-LR concentration in phytoplankton of eutrophic lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 57, Issue 8, pp. 1584–1593. DOI: 10.1139/f00-091.

34. Krüger, T., Hölzel, N. and Luckas, B. (2012). Influence of cultivation parameters on growth and microcystin production of *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae) isolated from Lake Chao (China). *Microbial Ecology*, Vol. 63, Issue 1, pp. 199–209. DOI: 10.1007/s00248-011-9899-3.

35. Li, J., Li, R. and Li, J. (2017). Current research scenario for microcystins biodegradation — A review on fundamental knowledge, application prospects and challenges. *Science of the Total Environment*, Vol. 595, pp. 615–632. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.285.

36. Malbrouck, C. and Kestemont, P. (2006). Effects of microcystins on fish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 25, Issue 1, pp. 72–86. DOI: 10.1897/05-029R.1.

37. Massey, I. Y., Yang, F., Ding, Z., Yang, S., Guo, J., Tezi, C., Al-Osman, M., Kamegni, R. B. and Zeng, W. (2018). Exposure routes and health effects of microcystins on animals and humans: A mini-review. *Toxicon*, Vol. 151, pp. 156–162. DOI: 10.1016/j.toxicon.2018.07.010.

38. Oh, H.-M., Lee, S. J., Jang, M.-H. and Yoon, B.-D. (2000). Microcystin production by *Microcystis aeruginosa* in a phosphorus-limited chemostat. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 66, Issue 1, pp. 176–179. DOI: 10.1128/aem.66.1.176-179.2000.

39. Paerl, H. W., Hall, N. S. and Calandrino, E. S. (2011). Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change. *Science*

of the Total Environment, Vol. 409, Issue 10, pp. 1739–1745. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.02.001.

40. Sivonen, K. and Jones, G. (1999). Cyanobacterial toxins. In: Chorus, I. and Bartram, J. (eds.) *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. London: E & FN Spon, pp. 41–111.

41. Srivastava, A., Choi, G.-G., Ahn, C.-Y., Oh, H.-M., Ravi, A. K. and Asthana, R. K. (2012). Dynamics of microcystin production and quantification of potentially toxicigenic *Microcystis* sp. using real-time PCR. *Water Research*, Vol. 46, Issue 3, pp. 817–827. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.056.

42. Vězie, C., Rapala, J., Vaitomaa, J., Seitsonen, J. and Sivonen, K. (2002). Effect of nitrogen and phosphorus on growth of toxic and nontoxic *Microcystis* strains and on intracellular microcystin concentrations. *Microbial Ecology*, Vol. 43, Issue 4, pp. 443–454. DOI: 10.1007/s00248-001-0041-9.

43. WHO (2003). *Guidelines for safe recreational water environments. Vol. 1. Coastal and fresh waters*. Geneva: World Health Organization, 219 p.

44. WHO (2017). *Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum*. Geneva: WHO, 541 p.

45. Zhang, D., Xie, P., Liu, Y. and Qiu, T. (2009). Transfer, distribution and bioaccumulation of microcystins in the aquatic food web in Lake Taihu, China, with potential risks to human health. *Science of the Total Environment*, Vol. 407, Issue 7, pp. 2191–2199. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.12.039.

Авторы

Смирнова Валерия Сергеевна

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», г. Петрозаводск,
Россия
E-mail: fyodorovavaleya@yandex.ru

Теканова Елена Валентиновна, канд. биол. наук

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», г. Петрозаводск,
Россия
E-mail: etekanova@mail.ru

Калинкина Наталия Михайловна, д-р биол. наук

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», г. Петрозаводск,
Россия
E-mail: cerioda@mail.ru

Чернова Екатерина Николаевна, канд. хим. наук

ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН» (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр
экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: s3561389@yandex.ru

Authors

Valeria Smirnova

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center
of the Russian Academy of Sciences,
Federal Research Center “Karelian Research Center of the
Russian Academy of Sciences”, Petrozavodsk, Russia
E-mail: fyodorovavaleya@yandex.ru

Elena Tekanova, PhD in Biology
Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center
of the Russian Academy of Sciences,
Federal Research Center “Karelian Research Center of the
Russian Academy of Sciences”, Petrozavodsk, Russia
E-mail: etekanova@mail.ru

Natalia Kalinkina, DSc in Biology
Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center
of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center

“Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences”,
Petrozavodsk, Russia
E-mail: cerioda@mail.ru

Ekaterina Chernova, PhD in Chemistry
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian
Academy of Sciences,
St. Petersburg Scientific Research Center for Ecological
Safety of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
E-mail: s3561389@yandex.ru