

Распространение токсигенных цианобактерий в водных объектах на территории Восточно-Европейской равнины

© 2024. Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с., М. А. Сысолятина¹, аспирант,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра

Уральского отделения Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

На основе литературных данных и результатов собственных исследований проанализировано распространение потенциально токсигенных цианобактерий по водоёмам и рекам, расположенным на территории Восточно-Европейской (Русской) равнины, и продуцируемых ими цианотоксинов. Среди потенциально токсигенных цианобактерий, наиболее часто обнаруживаемых в водных объектах изучаемой территории, можно выделить представителей рр. *Microcystis* и *Dolichospermum*, а также виды *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault и *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek. Наличие в водоёмах потенциально токсигенных цианобактерий подтверждено результатами исследований фитопланктона, проведённых с использованием молекулярно-генетических методов. Количественное содержание цианотоксинов определено с использованием иммуноферментных методов анализа, высокоэффективной жидкостной хроматографии, масс-спектрометрии. Отмечено, что в большинстве изученных водоёмов и водотоков наиболее распространёнными являются цианобактерии, продуцирующие микроцистин и анатоксин-а, а продуценты других групп токсинов встречаются реже. Суммарное содержание растворённых в воде микроцистинов в различных водных объектах изменяется в широких пределах: от следовых количеств до 1670 мкг/л при нормативе СанПиН 1.2.3685-21 для микроцистина-LR 1 мкг/л. Максимальное зафиксированное содержание анатоксина-а составляет 0,600 мкг/л.

Ключевые слова: водоём, цианобактерии, цианотоксины, микроцистин, сакситоксин, анатоксин, цилиндроспермопсин.

Distribution of toxigenic cyanobacteria in water bodies of the East European Plain

© 2024. T. I. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636[†]

M. A. Sysolyatina¹ ORCID: 0000-0002-7671-3993[†]

T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047[†]

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

We analyze the distribution of potentially toxigenic cyanobacteria in water bodies and rivers of the East European (Russian) Plain on the basis of relevant literature and the results of our studies. Special attention is paid to cyanotoxins: microcystins, which are hepatotoxins, cylindrospermopsin, which is hepatotoxin and cytotoxin, and anatoxins and saxitoxins, which are neurotoxins. *Microcystis* and *Dolichospermum* are the most represented genera of potentially toxigenic cyanobacteria, as well as *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault and *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek species. The above are the most commonly found in water bodies of the study area. The presence of potentially toxigenic cyanobacteria in water bodies was confirmed by the results of phytoplankton studies using molecular genetic methods. The quantitative content of the dissolved in water and intracellular cyanotoxins was determined using enzyme immunoassay methods, high-performance liquid chromatography, and mass spectrometry. It was noted that microcystin- and anatoxin-a-producing cyanobacteria are the most common in most of the studied water bodies and

streams, while saxitoxin- and cylindrospermopsin-producing cyanobacteria are less common. The total content of the dissolved microcystins in different water bodies varies from trace amounts up to 1670 µg/L with SanPiN 1.2.3685-21 standard for microcystin-LR 1 µg/L. The maximum recorded anatoxin-a content was 0.600 µg/L. The preparation of this review made it possible to supplement and summarize information on the distribution of toxigenic cyanobacteria and cyanotoxins in rivers, lakes and reservoirs of temperate latitudes, as well as on the quantitative content of cyanotoxins in water.

Keywords: water body, cyanobacteria, cyanotoxins, microcystin, saxitoxin, anatoxin, cylindrospermopsin.

Массовое развитие цианобактерий (ЦБ) отмечается в водоёмах по всему миру, в том числе во всех климатических зонах и федеральных округах России [1, 2]. Наиболее часто в континентальных водоёмах встречается комплекс из четырёх видов ЦБ, включающий в себя потенциальных продуцентов токсинов: *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek и *Dolichospermum lemmermannii* (Richter) P. Wacklin, L. Hoffmann & J. Komárek [3]. Несмотря на широкое повсеместное распространение потенциально токсичных ЦБ, сведения о наличии и распространении токсигенных ЦБ в водоёмах России до сих пор малочисленны и охватывают небольшое количество водных объектов, большей частью расположенных в Северо-Западном [4, 5] и Дальневосточном [6, 7] регионах страны.

Цель нашей работы – провести анализ распространения потенциально токсигенных цианобактерий, идентифицированных с использованием молекулярно-генетических методов анализа, а также цианотоксинов, синтезируемых ими, в водных объектах, расположенных на территории Восточно-Европейской (Русской) равнины.

Материалы и методы исследований

В обзоре обсуждаются и анализируются публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей, посвящённые идентификации генетических маркеров токсичности ЦБ во внутренних пресноводных водных объектах. Из всех найденных литературных источников отбирали те, в которых наличие токсигенных ЦБ подтверждено результатами молекулярно-генетического анализа. Поиск источников проводили при помощи систем Яндекс и Google, а также на сайте eLIBRARY.RU по поисковым запросам: «цианобактерии», «цианотоксины», «генетические маркеры токсичности», «ПЦР-анализ», «иммуноферментный анализ», «микроцистин», «анатоксин-а», «сакситоксин»,

«цилиндроспермопсин», «Cyanobacteria», «cyanotoxin», «genetic markers of toxicity», «PCR analysis», «enzyme immunoassay», «microcystin», «anatoxin-a», «saxitoxin», «cylindrospermopsin».

При изучении литературных источников основное внимание уделялось водным объектам, расположенным на территории Восточно-Европейской равнины в пределах России, в связи с тем, что на этой территории находятся крупнейшие российские города, водоснабжение которых осуществляется из крупных рек и водохранилищ, зачастую подверженных «цветению» воды потенциально токсичными ЦБ. Кроме того, так как Восточно-Европейская равнина обладает развитой озёрно-речной сетью, густота и режим которой меняются вместе с климатическими условиями в направлении с севера на юг, изучение различных водных объектов на её территории позволит выявить эколого-географические особенности распространения токсигенных ЦБ и составить прогноз их дальнейшего распространения по водоёмам России.

Разнообразие цианотоксинов в пресноводных водоёмах и их основные особенности

Цианобактерии синтезируют большое количество вторичных метаболитов, при этом особое внимание исследователей привлекают токсины, так как они представляют опасность для жизни и здоровья человека и животных [8]. В соответствии с химической структурой выделяют две основные группы цианотоксинов: циклические пептиды (микроцистины и нодулярины) и алкалоиды (цилиндроспермопсины, анатоксины, сакситоксины) [9, 10]. По действию на органы-мишени цианотоксины разделяют на гепатотоксины (например, микроцистины, цилиндроспермопсины, нодулярины), нейротоксины (анатоксины, сакситоксины, и др.), дерматоксины (лингбиатоксины, аплизиатоксины и др.) и цитотоксины (цилиндроспермопсины и др.) [11].

В данном обзоре мы рассмотрим цианотоксины, наиболее часто встречаемые в поверх-

ностных водах: микроцистины, сакситоксины, анатоксины и цилиндроспермопсины.

Микроцистины (МС) – одни из самых известных и широко распространённых цианотоксинов в пресноводных водоёмах. Впервые они были изолированы из штамма *M. aeruginosa* и названы в соответствии с родовым названием этих ЦБ. В состав МС входят семь аминокислот. Молекулярная масса этих цианотоксинов варьирует от 500 до 4000 Да, для большинства вариантов составляя 900–1100 Да. В настоящее время известно более 200 структурных вариантов МС, обладающих различной токсичностью [12], в том числе идентифицировано более 90 вариантов МС [8], **оказывающих токсическое** действие на печень, почки и репродуктивную систему [13–15]. Продукентами МС являются ЦБ многих родов, но чаще всего токсичное «цветение» воды вызывают представители рр. *Microcystis*, *Dolichospermum* и *Oscillatoria*. Микроцистины и нодуларины образуются в процессе роста ЦБ. Отличительной особенностью данных цианотоксинов является то, что они преимущественно содержатся внутри клеток ЦБ, а в воду выделяются после лизиса ЦБ. В лиофилизированных клетках ЦБ суммарная концентрация МС может достигать 7,3 мг/г [16], а в воде во время «цветения» водоёмов – 20 мг/л [17]. В 22 странах мира установлены нормативные уровни микроцистина-LR (МС-LR) в питьевой воде. Они составляют от 1 до 1,5 мкг/л [18]. Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) рекомендованы нормативы предельно допустимого содержания МС-LR в питьевой воде: при хроническом воздействии – 1 мкг/л, при краткосрочном – 12 мкг/л, для вод рекреационного назначения – 24 мкг/л [19]. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, в России для питьевых вод, вод водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, плавательных бассейнов и аквапарков предельно допустимая концентрация МС-LR составляет 1 мкг/л.

Сакситоксины (STX), известные также как паралитические яды моллюсков, являются одними из самых сильнодействующих токсинов, широко распространены в пресных и морских водах [20]. Молекулярная масса сакситоксинов составляет от 241 до 491 Да. Известно более 50 токсинов этой группы. Токсическое действие STX связано с селективной блокадой потенциалзависимых Na⁺- и Ca²⁺-каналов, которые модифицируют воротные механизмы K⁺-каналов в возбудимых клетках, тем самым

влияя на генерацию нервных импульсов и в конечном итоге подавляя мышечную стимуляцию, что приводит к параличу [21]. Уникальность STX заключается в том, что их продуцентами являются не только пресноводные ЦБ, такие как представители рр. *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Dolichospermum*, *Lyngbya*, *Planktothrix*, *Raphidiopsis*, но и морские водоросли динофлагелляты [12]. В воде пресных водоёмов концентрация STX варьирует в широких пределах: от следовых количеств до 193 мкг/л [22]. Согласно рекомендациям ВОЗ, предельно допустимое безопасное содержание STX в водоёмах рекреационного назначения составляет 30 мкг/л [21].

Анатоксины наряду с сакситоксинами относятся к нейротоксичным алкалоидам. Одним из самых опасных цианотоксинов этой группы является анатоксин-а (AN-а). Его молекулярная масса составляет 165 Да. Анатоксин-а имитирует действие ацетилхолина, способен сверхстимулировать мышечные клетки, что вызывает мышечное истощение, судороги, конвульсии и удушье из-за аноксии в клетках мозга [20]. Продукентами AN-а могут быть ЦБ нескольких родов, в том числе *Dolichospermum*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermum* и др. [12]. Согласно литературным данным, содержание AN-а в воде пресных водоёмов может достигать нескольких десятков мкг/л [22]. В работе [23] описан случай, когда в пробах воды, отобранных в местах обнаружения ЦБ *Tychonema* sp. в озере Тегел (Германия), концентрация AN-а достигала 1870 мкг/л.

Цилиндроспермопсин (CYN) – трициклический алкалоид, впервые выделенный из ЦБ *Cylindrospermopsis raciborskii* (Wołoszyńska) Seenayya & Subba Raju. Молекулярная масса CYN составляет 415 Да. В настоящее время известно более 12 видов-продуцентов этого цианотоксина, в том числе ЦБ рр. *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Chrysochloris* и *Oscillatoria* [24]. Действие CYN может вызывать цирроз и некроз печени, окислительный стресс и повреждение ДНК в клетках. Концентрация CYN в поверхностных водах может достигать 12 мкг/л и более [12]. Интересно, что в воде содержание CYN обычно выше, чем в клетках ЦБ [25]. Согласно рекомендациям ВОЗ, максимально допустимое безвредное содержание CYN в питьевой воде составляет 0,7 мкг/л при хроническом воздействии, 3 мкг/л – при краткосрочном, в водах рекреационного использования норматив содержания CYN равен 6 мкг/л [19].

Стоит отметить, что большинство видов ЦБ образуют более чем один вариант токси-

на. Например, некоторые виды р. *Microcystis* образуют MC-LR и менее токсичный MC-RR [12]. Состав микроцистинов, продуцируемых ЦБ, может варьировать в различных водоёмах и различных климатических условиях. В то же время, виды, продуцирующие цианотоксины в одних климатических условиях, не всегда способны к синтезу токсинов в других условиях. Например, *C. raciborskii* является основным продуцентом СУН в Австралии, Новой Зеландии и Азии, но в Европе, Америке и Африке штаммы этого вида, как правило, не имеют генов биосинтеза данного токсина [12]. В целом, на рост ЦБ и образование токсинов оказывают влияние многие факторы окружающей среды, такие как наличие в воде биогенных элементов, загрязняющих веществ, интенсивность освещения, температура, pH, общее солесодержание и др. Для выявления экологических факторов, оказывающих влияние на образование токсинов ЦБ, важное значение имеют поисковые исследования, направленные на обнаружение и идентификацию цианотоксинов в водоёмах различных территорий.

Распространение и содержание цианотоксинов в водоёмах Восточно-Европейской равнины

Первые публикации работ по идентификации и количественной оценке цианотоксинов в водоёмах России начали появляться в 2000-х гг., что было связано с внедрением в работу научных и производственных организаций высокоточного оборудования и разработкой новых методик анализа. Так, одна из первых работ, посвящённая идентификации AN-а и двух микроцистинов (MC-LR, MC-RR), а также других опасных экотоксикантов в озёрах Сестрорецкий разлив, Суздальское, Щучье и Безымянное, была выполнена с использованием жидкостной хромато-масс-спектрометрии [4]. Авторы работы отмечают, что максимальная концентрация AN-а в период исследования достигала 0,600 мкг/л, а MC – 0,080 мкг/л [4]. В период исследований доминирующее положение в фитопланктоне озёр занимала ЦБ *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek. Позднее, в 2011 г. в оз. Сестрорецкий разлив также были обнаружены MC, максимальная их концентрация достигала 0,34 мкг/л [26], а в 2017 г. концентрация MC-LR в воде из оз. Сестрорецкий разлив достигала 50 мкг/л [27]. Из доминантов «цветения» воды, помимо отмеченного ранее

P. agardhii, также можно выделить следующие виды ЦБ: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Dolichospermum planctonicum* (Brunnthal) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *D. flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *D. spiroides* (Klebahn) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii* (Komárek) Komárek ex Komárek, *M. viridis* (A. Braun) Lemmermann. В 2018 г. максимальное содержание внутриклеточных MC (всего 11 структурных вариантов) в биомассе ЦБ в период «цветения» воды в оз. Сестрорецкий разлив достигало 3,267 мкг/л, в Нижнем Суздальском озере – 0,228 мкг/л, а в воде озёр не превышало 0,004 мкг/л [28]. Хромато-масс-спектрометр высокого разрешения использовали для определения концентраций MC и AN-а в воде Рыбинского, Горьковского и Чебоксарского водохранилищ в 2010 г. [29]. Авторы работы отмечают, что AN-а в изучаемых водоёмах обнаружен не был, а суммарное содержание MC составляло от 0,02 до 8,4 мкг/л. Численно и по уровню биомассы на всех водохранилищах доминировали ЦБ *A. flos-aquae* и *M. aeruginosa*. Также хромато-масс-спектрометрия была использована для определения трёх структурных вариантов микроцистинов (MC-LR, MC-RR и MC-YR) в пробах воды из Воронежского водохранилища в 2017 г., при этом суммарное содержание MC в воде на разных участках водохранилища составляло от следовых количеств до 89 мкг/л [30, 31]. В фитопланктоне Воронежского водохранилища доминировали *M. aeruginosa* и его формы, а также *M. ichthyoblabe* (G. Kunze) Kützing. В 2017–2018 гг. проведено определение AN-а и различных вариантов MC в воде Псковского и Чудского озёр [5]. Авторы отмечают, что ни в одной из проанализированных проб AN-а обнаружен не был, содержание MC в воде Чудского озера было незначительное, а в воде Псковского озера достигало значений 0,22 мкг/л [5, 32]. Всего в Псковском и Чудском озёрах обнаружено 9 аргинин-содержащих структурных вариантов MC. Доминирующими таксонами ЦБ в данных озёрах были: *Planktolyngbya limnetica* (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg, *Woronichinia compacta* (Lemmermann) Komárek & Hindák и виды р. *Aphanocapsa* [5]. В 2019 г. с помощью метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) и масс-спектрометрии высокого разрешения определено суммарное содержание MC в «цветущей» воде оз. Святозеро (Республика Карелия) [33]. Оно составило 6,22 мкг/л. Всего

в исследуемых пробах из озера идентифицировано 8 структурных вариантов МС, содержащих в своей структуре аргинин. Хотя в целом для оз. Святозеро не характерно преобладание ЦБ в фитопланктоне (обычно доля ЦБ не превышает 20%), в пятне «цветения» доминировали ЦБ: *M. wesenbergii*, *M. aeruginosa*, *Woronichinia naegeliana* (Unger) Elenkin, *M. ichthyoblabe* и *M. flos-aquae* (Wittrock) Kirchner. Методом ВЭЖХ определено содержание МС в биомассе «цветений», наблюдаемых на Нижнем Суздальском, Красном и Ладожском озёрах Ленинградской области [34]. В каждом из озёр было обнаружено присутствие от 2 до 6 вариантов МС.

Высокое содержание МС, более чем в 5 раз превышающее норматив ВОЗ (1,0 мкг/л), было обнаружено в Куйбышевском водохранилище Республики Татарстан в 2011 г. с использованием иммуноферментного анализа (ИФА) [35]. В работе [36] сообщается, что в пойменных частях Куйбышевского водохранилища концентрации МС достигали 200–470 мкг/л. Метод ИФА позволил определить суммарное содержание МС в воде оз. Нижний Кабан (г. Казань) – 1,52 мкг/л [37]. «Цветение» воды в оз. Нижний Кабан было вызвано *A. flos-aquae*. С помощью ИФА обнаружен МС-LR в воде оз. Неро в 2010 и 2011 гг. в концентрации выше 5,0 мкг/л [38, 39]. Потенциально токсигенными ЦБ в озере являлись виды pp. *Microcystis* (*M. aeruginosa*, *M. wesenbergii*, *M. viridis* (A. Braun) Lemmermann, *M. flos-aquae*, *M. novacekii* (Komárek) Compère), *Dolichospermum* (*D. spiroides*, *D. affine* (Lemmermann) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *D. flos-aquae*) и *P. agardhii* [38]. Определено суммарное содержание МС в воде Горьковского водохранилища в 2009–2011 гг., оно составляло в разные периоды наблюдений от 0,23 до 725,1 мкг/л [39]. Потенциальными продуцентами МС в этом водохранилище могли быть виды р. *Microcystis*, *D. flos-aquae* и *Gloeotrichia echinulata* P. G. Richter. В апреле-ноябре 2013 г. суммарное содержание МС в воде Горьковского водохранилища изменялось от следовых количеств до 12,5 мкг/л, а в августе в пятнах «цветения» концентрация растворённых в воде МС достигала рекордных 1670 мкг/л [40]. С помощью ИФА проведено количественное определение МС, STX, CYN и AN-а в воде Рыбинского водохранилища [41]. Авторы работы отмечают, что наличие CYN и AN-а в воде данного водохранилища не зафиксировано, STX присутствовали в воде в следовых количествах, а концентрация МС изменялась

в пределах 0,09–5,8 мкг/л. В воде Рыбинского водохранилища выявлено присутствие *mscE*-генсодержащих ЦБ: *M. aeruginosa*, *M. viridis*, *P. agardhii* и видов р. *Dolichospermum*. С помощью ПЦР и ИФА методов обнаружено присутствие 5 вариантов микроцистинов (МС-LR, МС-RR, МС-YR, деметилированные формы [D-Asp³]МС-LR и [D-Asp³]МС-RR) и AN-а в воде Цимлянского водохранилища в 2013 г. [42]. Доминирующие позиции среди ЦБ в Цимлянском водохранилище занимали виды pp. *Microcystis* и *Planktothrix*.

В 2016 и 2018 гг. с помощью молекулярно-генетических методов анализа был проведён анализ распределения цианотоксинов и их потенциальных продуцентов в 12 водохранилищах Волго-Камско-Донского каскада [43]. В ходе исследования было отмечено, что концентрация МС (суммарно внутриклеточной и растворённой в воде фракции) варьировала от значений менее 0,1 мкг/л в июне до 16,4 мкг/л в августе. Доля проб с содержанием МС выше 1 мкг/л составила 25%. Всего было идентифицировано 14 вариантов МС. Потенциальными продуцентами МС в исследуемых водохранилищах были виды pp. *Microcystis* и *Dolichospermum*. В Цимлянском водохранилище как возможные продуценты нейротоксичного AN-а были идентифицированы ЦБ *Cuspidothrix issatschenkoi* (Usachev) P. Rajaniemi, Komárek, R. Willame, P. Hrouzek, K. Kastovská, L. Hoffmann & K. Sivonen и/или *Raphidiopsis mediterranea* Skuja.

Наши исследования, проведённые в летний сезон 2023 г., также подтвердили наличие ЦБ, продуцирующих МС и AN-а, в двух крупнейших водохранилищах Кировской области: Белохолуницком и Омутнинском. Наличие ЦБ, являющихся продуцентами МС, подтверждено успешной амплификацией участка гена *mscE*. Согласно микроскопическому анализу проб фитопланктона, наиболее вероятными продуцентами МС в изучаемых водохранилищах были ЦБ из pp. *Microcystis* и *Dolichospermum*. На большинстве исследованных участков водохранилищ впервые было детектировано развитие ЦБ, способных потенциально продуцировать AN-а, что подтверждено идентификацией методом ПЦР в образцах «планктонной» ДНК специфичного для ЦБ участка гена *anaC*. С помощью микроскопического анализа в фитопланктоне изучаемых водохранилищ обнаружены виды *A. flos-aquae*, *Dolichospermum planctonicum*, *D. flos-aquae* и *C. issatschenkoi*, известные из

литературы как продуценты АН-а. Интересно, что *C. issatschenkoi* часто отмечается среди продуцентов АН-а в водоёмах Европы [44–47], а в водных объектах России встречается реже [43]. Генетические маркеры продуцирования других типов детектируемых цианотоксинов (СУН и СТХ) **не были обнаружены в исследованных пробах из Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ.**

Таким образом, наиболее часто в озёрах и водохранилищах, расположенных на территории Восточно-Европейской равнины, обнаруживаются различные варианты МС. Их концентрации изменяются в широких пределах: от следовых значений до 1670 мкг/л, максимальное содержание другого цианотоксина – АН-а, согласно опубликованным данным, достигало значения 0,600 мкг/л. При этом количество водоёмов, по которым есть опубликованные данные о содержании в них цианотоксинов, до сих пор крайне мало.

Распространение и содержание цианотоксинов в реках Восточно-Европейской равнины

Данные об идентификации и количественной оценке содержания цианотоксинов в реках России ещё реже представлены в литературе, чем данные по озёрам и водохранилищам, хотя питьевое водоснабжение многих населённых пунктов осуществляется именно из рек. Стоит отметить, что высокие скорости течения воды в реках и меньшее по сравнению со стоячими водоёмами прогревание воды сдерживают массовое развитие фитопланктона в реках, в том числе потенциально токсичных видов ЦБ, но тем не менее цианотоксины могут присутствовать в речных водах в значительных количествах. Так, в р. Каме и р. Меше в Республике Татарстан обнаружены МС в концентрации до 0,50 мкг/л при нормативе СанПиН 1.2.3685-21 для МС-LR 1,0 мкг/л [35, 37]. В р. Волге (в районе г. Ярославль) содержание МС также составило 0,50 мкг/л, а в р. Солонице, правом притоке р. Волги, более чем в 5 раз превышало норматив СанПиН [38, 39]. В р. Которосль (Ярославская обл.) в период наблюдений с апреля по октябрь 2013 г. суммарное содержание МС изменялось от 0,04 до 6 мкг/л [40]. Согласно данным работы [48], максимальные концентрации ещё одного распространённого цианотоксина – АН-а в воде р. Дон, являющейся водоисточником г. Ростова-на-Дону, и р. Москвы (в месте водозабора Рублевской станции водоподготовки)

составляли 0,557 и 0,327 мкг/л соответственно, а в питьевой воде после водоочистки перед поступлением в разводящую сеть г. Ростова-на-Дону и на выходе с Рублевской станции водоподготовки в г. Москве уже достигали значений 0,231 и 0,529 мкг/л соответственно. Увеличение содержания АН-а в питьевой воде г. Москвы по сравнению с исходной водой, отобранной из водоисточника – р. Москвы, авторы объясняют накоплением на загрузках фильтров станции водоподготовки клеток ЦБ, поступающих из р. Москвы во время «цветения» воды, которые постепенно разрушаются, в результате чего происходит выход токсина в воду и его вторичное накопление на фильтрах с последующим вымыванием.

Анализируя работы, посвящённые изучению распространения цианотоксинов в реках и водоёмах, можно отметить, что большинство исследователей уделяют внимание водоёмам: озёрам и водохранилищам. Работы по изучению содержания цианотоксинов в воде рек единичны. В реках, как и в водоёмах, чаще обнаруживаются МС и АН-а, при этом максимальные содержания АН-а, обнаруженные в реках, на порядок ниже содержания МС. Так, на изучаемой нами территории для МС отмечены максимальные содержания более 5 мкг/л, а для АН-а – 0,557 мкг/л.

Заключение

Таким образом, по литературным данным и собственным исследованиям проанализировано распространение потенциально токсигенных ЦБ и продуцируемых ими цианотоксинов по водоёмам и рекам, расположенным на территории Восточно-Европейской (Русской) равнины. В ходе наших исследований обнаружено присутствие в фитопланктоне Омутнинского водохранилища ЦБ *C. issatschenkoi*, которая часто является продуцентом АН-а в европейских водоёмах, а в Российских водных объектах встречается довольно редко. Несмотря на актуальность изучения содержания цианотоксинов в водных объектах, количество опубликованных работ, посвящённых данной теме, до сих пор остаётся ограниченным. Основные причины, влияющие на количество проводимых исследований по идентификации и количественной оценке цианотоксинов в водных объектах: высокая стоимость аналитического оборудования, расходных материалов, в том числе стандартных образцов сравнения для проведения исследований, а также отсутствие квалифицированного пер-

сонала. Вместе с тем, анализ литературных данных показал, что количество исследований, посвящённых изучению цианотоксинов, начиная с 2000-х гг., возрастает и охватывает большее число водных объектов. Повышается качество и глубина проведённых исследований по изучению потенциально токсигенных ЦБ и продуцируемых ими токсинам. Наличие в водных объектах потенциально токсигенных ЦБ подтверждается не только методами световой микроскопии, но и новыми более точными методами качественного и количественного анализа: ИФА, ПЦР-диагностикой, ВЭЖХ и хромато-масс-спектрометрией. Отмечено, что в большинстве изученных водных объектов наиболее часто обнаруживаются микроцистины и анатоксины, реже другие виды цианотоксинов. Содержание МС в воде различных водных объектов изменяется в широких пределах: от следовых количеств до 1670 мкг/л, максимальное зафиксированное содержание АН-а составляет 0,600 мкг/л. Среди потенциально токсигенных ЦБ, наиболее часто обнаруживаемых в водных объектах, можно выделить представителей рр. *Microcystis* и *Dolichospermum*, а также виды *A. flos-aquae* и *P. agardhii*. Подготовка данного обзора позволила дополнить и обобщить сведения о распространении токсигенных ЦБ и цианотоксинов по рекам, озёрам и водохранилищам умеренных широт и о количественном содержании цианотоксинов в воде.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-77-01034).

Литература

1. Namsaraev Z., Melnikova A., Komova A., Ivanov V., Rudenko A., Ivanov E. Algal bloom occurrence and effects in Russia // *Water*. 2020. V. 12. No. 1. Article No. 285. doi: 10.3390/w12010285
2. Barinova S. Environmental preferences of Cyanobacteria in the gradient of macroclimatic factors and pollution // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 1. С. 51–57. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-051-057
3. Намсараев З.Б., Мельникова А.А. Таксономическое разнообразие доминирующих видов цианобактерий во время «цветений» водоёмов России // *Вопросы современной альгологии*. 2022. № 2 (29). С. 29–37. doi: 10.33624/2311-0147-2022-2(29)-29-37
4. Русских Я.В., Чернова Е.Н., Некрасова Л.В., Воякина Е.Ю., Никифоров В.А., Жаковская З.А. Первые результаты определения новых экотоксикантов в водоёмах Северо-Запада РФ // *Региональная экология*. 2011. № 1-2 (31). С. 82–87.
5. Воякина Е.Ю., Русских Я.В., Чернова Е.Н., Жаковская З.А. Токсичные цианобактерии и их метаболиты в водоёмах Северо-Запада России // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 1. С. 124–129. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-124-129
6. Белых О.И., Тихонова И.В., Кузьмин А.В., Сороковикова Е.Г., Потапов С.А., Галкин А.В., Федорова Г.А. Токсин-продуцирующие цианобактерии в озере Байкал и водоёмах Байкальского региона (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 1. С. 21–27. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-021-027
7. Сороковикова Е.Г., Тихонова И.В., Подлесная Г.В., Белых О.И. Оценка и прогноз развития токсичных цианобактерий в фитопланктоне Богучанского водохранилища // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2019. № 1 (77). С. 86–93. doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.86-93
8. Белых О.И., Гладких А.С., Сороковикова Е.Г., Тихонова И.В., Потапов С.А., Федорова Г.А. Микроцистин-продуцирующие цианобактерии в водоёмах России, Беларуси и Украины // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013. № 21. С. 363–378.
9. Chorus I., Bartram J. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to public health significance, monitoring and management*. London: Chapman & Hall, 1999. 446 p.
10. Zurawell R.W., Chen H.R., Burke J.M., Prepas E.E. Hepatotoxic cyanobacteria: A review of the biological importance of microcystins in freshwater environments // *J. Toxicol. Environ. Health B. Crit. Rev.* 2005. V. 8. No. 1. P. 1–37. doi: 10.1080/10937400590889412
11. Калининкова Т.Б., Егорова А.В., Шагидуллин Р.Р. Подход «Единое здоровье» как эффективный способ управления экологическими рисками (на примере цианотоксинов) // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2021. № 9. С. 130–145. doi: 10.17076/lim1362
12. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И., Поляк М.С. Цианобактерии и их метаболиты. СПб.: Нестор-История, 2022. 328 с.
13. Botha N., van de Venter M., Downing T.G., Shephard E.G., Gehringer M.M. The effect of intraperitoneally administered microcystin-LR on the gastrointestinal tract of Balb/c mice // *Toxicol.* 2004. V. 43. No. 3. P. 251–254. doi: 10.1016/j.toxicol.2003.11.026
14. Chen L., Chen J., Zhang X., Xie P. A review of reproductive toxicity of microcystins // *J. Hazard. Mater.* 2016. V. 301. P. 381–399. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.08.041
15. Chen L., Giesy J.P., Adamovsky O., Svirčev Z., Meriluoto J., Codd G.A., Mijovic B., Shi T., Tuo X., Li S.C., Pan B.-Z., Chen J., Xie P. Challenges of using blooms of *Microcystis* spp. in animal feeds: A comprehensive review of nutritional, toxicological and microbial health evaluation // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 764. Article No. 142319. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142319
16. Zhang Q.-X., Carmichael W.W., Yu M.-J., Li S.-H. Cyclic peptide hepatotoxins from freshwater cyanobacterial (blue-green algae) waterblooms collected in Central

China // Environ. Toxicol. Chem. 1991. V. 10. P. 313–321. doi: 10.1002/etc.5620100303

17. Fastner J., Humpage A. Hepatotoxic cyclic peptides – microcystins and nodularins // Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management / Eds. I. Chorus, M. Welker. Second edition. World Health Organization, 2021. P. 21–52.

18. Егорова Н.А., Кузь Н.В., Синицына О.О. Материалы к обоснованию гигиенического норматива микроцистина-LR в воде водных объектов // Гигиена и санитария. 2018. № 97 (14). С. 1046–1052. doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-14-1046-52

19. Дроздова Е.В. Моделирование агрегированной экспозиции химических веществ биологического происхождения при различных видах водопользования на примере приоритетных цианотоксинов // Проблемы здоровья и экологии. 2024. № 21 (2). С. 103–116. doi: 10.51523/2708-6011.2024-21-2-13

20. Волошко Л.Н., Пиневиц А.В. Разнообразие токсинов цианобактерий // Астраханский вестник экологического образования. 2014. № 1 (27). С. 68–80.

21. Pinto A., Macário I.P.E., Marques S.M., Lourenço J., Domingues I., Botelho M.J., Asselman J., Pereira P., Pereira J.L. A short-term exposure to saxitoxin triggers a multitude of deleterious effects in *Daphnia magna* at levels deemed safe for human health // Sci. Total Environ. 2024. V. 951. Article No. 175431. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175431

22. Christensen V.G., Khan E. Freshwater neurotoxins and concerns for human, animal, and ecosystem health: A review of anatoxin-a and saxitoxin // Sci. Total Environ. 2020. V. 736. Article No. 139515. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139515

23. Fastner J., Beulker C., Geiser B., Hoffmann A., Kröger R., Teske K., Hoppe J., Mundhenk L., Neurath H., Sagebiel D., Chorus I. Fatal neurotoxicosis in dogs associated with tychoplanktic, anatoxin-a producing *Tycho-nema* sp. in mesotrophic lake Tegel, Berlin // Toxins. 2018. V. 10. Article No. 60. doi: 10.3390/toxins10020060

24. Калининкова Т.Б., Гайнутдинов М.Х., Шагидуллин Р.Р. Методы биотестирования токсинов, продуцируемых цианобактериями (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2018. № 2 (14). С. 35–46.

25. Rücker J., Stüken A., Nixdorf B., Fastner J., Chorus I., Wiedner C. Concentrations of particulate and dissolved cylindrospermopsin in 21 *Aphanizomenon*-dominated temperate lakes // Toxicon. 2007. V. 50. No. 6. P. 800–809. doi: 10.1016/j.toxicon.2007.06.019

26. Русских Я.В., Чернова Е.Н., Воякина Е.Ю., Никифоров В.А., Жаковская З.А. Определение цианотоксинов в водной матрице методом высокоэффективной жидкостной хроматографии - масс-спектрометрии высокого разрешения // Известия СПбГТИ (ТУ). 2012. № 17. С. 61–66.

27. Медведева Н.Г., Зиновьева С.В., Зайцева Т.Б. Микробная трансформация микроцистина-LR в образцах природных вод // Региональная экология. 2017. № 2 (48). С. 56–61.

28. Medvedeva N.G., Zaytseva T.B., Kuzikova I.L., Chernova E.N. Microcystin-LR biodestruction by autochthonous microbiota of different water bodies in the Northwest of Russia // Biol. Bull. 2023. V. 50. No. 6. P. 1376–1387. doi: 10.1134/S1062359023600496

29. Корнева Л.Г., Соловьева В.В. Фитопланктон и содержание цианотоксинов в Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском водохранилищах в период аномально жаркого лета 2010 г. // Вода: химия и экология. 2014. № 8. С. 24–29.

30. Петросян В.С., Анциферова Г.А., Акимов Л.М., Кульнев В.В., Шевырев С.Л., Акимов Е.Л. Оценка и прогноз эколого-санитарного состояния Воронежского водохранилища на 2018–2019 гг. // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 7. С. 52–56. doi: 10.18412/1816-0395-2019-07-52-56

31. Анциферова Г.А., Шевырев С.Л., Кульнев В.В., Русова Н.И., Галкина Е.С. Эколого-санитарное состояние Воронежского водохранилища в условиях «цветения» вод по материалам 2016–2022 годов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 23. № 3. С. 147–154. doi: 10.18500/1819-7663-2023-23-3-147-154

32. Дрозденко Т.В., Александрова С.М., Антал Т.К., Тихомирова Е.И. Структурные показатели и токсичные виды цианобактерий Псковского озера // Поволжский экологический журнал. 2022. № 4. С. 388–399. doi: 10.35885/1684-7318-2022-4-388-399

33. Смирнова В.С., Теканова Е.В., Калинин Н.М., Чернова Е.Н. Состояние фитопланктона и цианотоксины в пятне «цветения» в озере Святозеро (бассейн Онежского озера, Россия) // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 1 (85). С. 50–60. doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60

34. Волошко Л.Н. Токсины и другие биологически активные вещества, синтезируемые цианобактериями в водоёмах Ленинградской области // Астраханский вестник экологического образования. 2016. № 1 (35). С. 28–35.

35. Никитин О.В., Степанова Н.Ю., Мукминов М.Н. Индикация цианотоксинов в природных водах Республики Татарстан // Ученые записки КГБВМ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 4. С. 341–344.

36. Беспалова К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Питьевое водоснабжение в условиях массового развития синезелёных водорослей на водохранилищах // Водное хозяйство России. 2021. № 2. С. 121–134. doi: 10.35567/1999-4508-2021-2-9

37. Степанова Н.Ю., Халиуллина Л.Ю., Никитин О.В., Латыпова В.З. Структура и токсичность цианобактерий в рекреационных зонах водоёмов Казанского региона // Вода: химия и экология. 2012. № 11. С. 67–72.

38. Сиделев С.И., Фомичев А.А., Бабаназарова О.В., Зубишина А.А. Выявление микроцистин-продуцирующих цианобактерий в водоёмах Верхней Волги // Микробиология. 2013. Т. 82. № 3. С. 370–371. doi: 10.7868/S0026365613020146

39. Сиделев С.И., Зубишина А.А., Бабаназарова О.В., Кутузова В.Ю., Мартьянов О.В. Мониторинг содержания цианотоксинов микроцистинов в водоемах Верхней Волги: молекулярно-генетический и аналитический подходы // Вода: химия и экология. 2014. № 8 (74). С. 88–94.

40. Сиделев С.И., Бабаназарова О.В. Обнаружение цианобактериальных токсинов в источниках водоснабжения и водопроводной воде некоторых городов России: поиск продуцентов и апробация методов удаления // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 218–229. doi: 10.31857/S0321059620020182

41. Сиделев С.И., Корнева Л.Г., Соловьева В.В., Зубишина А.А., Плигин Д.Н. Молекулярно-генетическая идентификация и сезонная сукцессия токсигенных цианобактерий в фитопланктоне Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2016. № 4. С. 37–44.

42. Сиделев С.И., Голоколенова Т.Б., Чернова Е.Н., Русских Я.В. Анализ фитопланктона Цимлянского водохранилища (Россия) на наличие цианобактериальных гепато- и нейротоксинов // Микробиология. 2015. Т. 84. № 6. С. 732–742. doi: 10.7868/S0026365615060130

43. Корнева Л.Г., Соловьева В.В., Сиделев С.И., Чернова Е.Н., Русских Я.В. Экология и метаболическая активность цианобактерий крупных разнотипных равнинных водохранилищ Европейской части России // Вопросы современной альгологии. 2021. № 2 (26). С. 29–37. doi: 10.33624/2311-0147-2021-2(26)-29-37

44. Toporowska M., Pawlik-Skowrońska B., Kalinowska R. Mass development of diazotrophic cyanobacteria (Nostocales) and production of neurotoxic anatoxin-a in a *Planktothrix* (Oscillatoriales) dominated temperate lake // Water Air Soil Pollut. 2016. V. 227. Article No. 321. doi: 10.1007/s11270-016-3004-y

45. Ballot A., Scherer P.I., Wood S.A. Variability in the anatoxin gene clusters of *Cuspidothrix issatschenkoi* from Germany, New Zealand, China and Japan // PLoS One. 2018. V. 13. No. 7. P. e0200774. doi: 10.1371/journal.pone.0200774

46. Karosienė J., Savadova-Ratkus K., Toruńska-Sitarz A., Koreivienė J., Kasperovičienė J., Vitonytė I., Błaszczyk A., Mazur-Marzec H. First report of saxitoxins and anatoxin-a production by cyanobacteria from Lithuanian lakes // Eur. J. Phycol. 2020. V. 55. No. 3. P. 327–338. doi: 10.1080/09670262.2020.1734667

47. Stoyneva-Gärtner M., Stefanova K., Uzunov B., Radkova M., Gärtner G. *Cuspidothrix* is the first genetically proved anatoxin A producer in Bulgarian lakes and reservoirs // Toxins. 2022. V. 14. No. 11. Article No. 778. doi: 10.3390/toxins14110778

48. Кузь Н.В., Синицына О.О., Турбинский В.В. Результаты изучения эмбриотоксического действия цианотоксина анатоксина-а // Анализ риска здоровью – 2023. Совместно с международной встречей по окружающей среде и здоровью RISE-2023: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. / под ред. проф. А.Ю. Поповой, акад.

РАН Н.В. Зайцевой. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2023. Т. 2. С. 69–74.

References

1. Namsaraev Z., Melnikova A., Komova A., Ivanov V., Rudenko A., Ivanov E. Algal bloom occurrence and effects in Russia // Water. 2020. V. 12. No. 1. Article No. 285. doi: 10.3390/w12010285

2. Barinova S. Environmental preferences of Cyanobacteria in the gradient of macroclimatic factors and pollution // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 51–57. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-051-057

3. Namsaraev Z.B., Melnikova A.A. Taxonomic diversity of the dominant cyanobacteria species during blooms in water bodies of Russia // Voprosy sovremennoi algologii (Issues of modern algology). 2022. No. 2 (29). P. 29–37 (in Russian). doi: 10.33624/2311-0147-2022-2(29)-29-37

4. Russkikh Ya.V., Chernova E.N., Nekrasova L.V., Voyakina E.Yu., Nikiforov V.A., Zhakovskaya Z.A. First results of determination of new ecotoxicants in water bodies of the North-West of the Russian Federation // Regionalnaya ekologiya. 2011. No. 1-2 (31). P. 82–87 (in Russian).

5. Voyakina E.Ju., Russkikh Ia.V., Chernova E.N., Zhakovskaya Z.A. Toxic cyanobacteria and their metabolites in the lakes of the Russian Northwest // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 124–129 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-124-129

6. Belykh O.I., Tikhonova I.V., Kuzmin A.V., Sorokovikova E.G., Potapov S.A., Galkin A.V., Fedorova G.A. Toxin-producing cyanobacteria in Lake Baikal and reservoirs of Baikal region (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 21–27 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-021-027

7. Sorokovikova E.G., Tikhonova I.V., Podlesnaya G.V., Belykh O.I. Evaluation and prediction of toxic cyanobacterial blooming in phytoplankton of the Boguchany reservoir // Voda i ekologiya: problemy i resheniya. 2019. No. 1 (77). P. 86–93 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.86-93

8. Belykh O.I., Gladkikh A.S., Sorokovikova E.G., Tikhonova I.V., Potapov S.A., Fedorova G.A. Microcystin-producing cyanobacteria in water bodies of Russia, Belarus and Ukraine // Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya. 2013. No. 21. P. 363–378 (in Russian).

9. Chorus I., Bartram J. Toxic cyanobacteria in water: a guide to public health significance, monitoring and management. London: Chapman & Hall, 1999. 416 p.

10. Zurawell R.W., Chen H.R., Burke J.M., Prepas E.E. Hepatotoxic cyanobacteria: A review of the biological importance of microcystins in freshwater environments // J. Toxicol. Environ. Health B. Crit. Rev. 2005. V. 8. No. 1. P. 1–37. doi: 10.1080/10937400590889412

11. Kalinnikova T.B., Egorova A.V., Shagidullin R.R. The “one health” approach as a possible mode of ecological risk assessment (example of cyanotoxins) // Trudy Karel-

skogo nauchnogo tsentra RAN. 2021. No. 9. P. 130–145 (in Russian). doi: 10.17076/lim1362

12. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I., Polyak M.S. Cyanobacteria and their metabolites. Sankt-Peterburg: Nestor-Istoriya, 2022. 328 p. (in Russian).

13. Botha N., van de Venter M., Downing T.G., Shephard E.G., Gehringer M.M. The effect of intraperitoneally administered microcystin-LR on the gastrointestinal tract of Balb/c mice // *Toxicon*. 2004. V. 43. No. 3. P. 251–254. doi: 10.1016/j.toxicon.2003.11.026

14. Chen L., Chen J., Zhang X., Xie P. A review of reproductive toxicity of microcystins // *J. Hazard. Mater.* 2016. V. 301. P. 381–399. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.08.041

15. Chen L., Giesy J.P., Adamovsky O., Svirčev Z., Meriluoto J., Codd G.A., Mijovic B., Shi T., Tuo X., Li S.C., Pan B.-Z., Chen J., Xie P. Challenges of using blooms of *Microcystis* spp. in animal feeds: A comprehensive review of nutritional, toxicological and microbial health evaluation // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 764. Article No. 142319. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142319

16. Zhang Q.-X., Carmichael W.W., Yu M.-J., Li S.-H. Cyclic peptide hepatotoxins from freshwater cyanobacterial (blue-green algae) waterblooms collected in Central China // *Environ. Toxicol. Chem.* 1991. V. 10. P. 313–321. doi: 10.1002/etc.5620100303

17. Fastner J., Humpage A. Hepatotoxic cyclic peptides – microcystins and nodularins // *Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management* / Eds. I. Chorus, M. Welker. Second edition. World Health Organization, 2021. P. 21–52.

18. Egorova N.A., Kuz N.V., Sinitsyna O.O. Materials for the substantiation of the hygienic standard of microcystin-LR in water of water objects // *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018. No. 97 (11). P. 1046–1052 (in Russian). doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-11-1046-52

19. Drazdova AV. Modeling of aggregated exposure to chemical substances of biological origin for various types of water use in case of priority cyanotoxins // *Health and Ecology Issues*. 2024. No. 21 (2). P. 103–116 (in Russian). doi: 10.51523/2708-6011.2024-21-2-03

20. Voloshko L.N., Pinevich A.V. Diversity of cyanobacterial toxins // *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2014. No. 1 (27). P. 68–80 (in Russian).

21. Pinto A., Macário I.P.E., Marques S.M., Lourenço J., Domingues I., Botelho M.J., Asselman J., Pereira P., Pereira J.L. A short-term exposure to saxitoxin triggers a multitude of deleterious effects in *Daphnia magna* at levels deemed safe for human health // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 951. Article No. 175431. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175431

22. Christensen V.G., Khan E. Freshwater neurotoxins and concerns for human, animal, and ecosystem health: A review of anatoxin-a and saxitoxin // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 736. Article No. 139515. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139515

23. Fastner J., Beulker C., Geiser B., Hoffmann A., Kröger R., Teske K., Hoppe J., Mundhenk L., Neurath H., Sagebiel D., Chorus I. Fatal neurotoxicosis in dogs associated with tychoplanktic, anatoxin-a producing *Tycho-nema* sp. in mesotrophic lake Tegel, Berlin // *Toxins*. 2018. V. 10. Article No. 60. doi: 10.3390/toxins10020060

24. Kalinnikova T.B., Gainutdinov M.Kh., Shagidullin R.R. Methods for bioassay of toxins produced by cyanobacteria (review) // *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2018. No. 2 (14). P. 35–46 (in Russian).

25. Rücker J., Stüken A., Nixdorf B., Fastner J., Chorus I., Wiedner C. Concentrations of particulate and dissolved cylindrospermopsin in 21 *Aphanizomenon*-dominated temperate lakes // *Toxicon*. 2007. V. 50. No. 6. P. 800–809. doi: 10.1016/j.toxicon.2007.06.019

26. Russkikh Ya.V., Chernova E.N., Voyakina E.Yu., Nikiforov V.A., Zhakovskaya Z.A. Determination of cyanotoxins in aqueous matrix by high-performance liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry // *Izvestiya SPbGTI (TU)*. 2012. No. 17. P. 61–66 (in Russian).

27. Medvedeva N.G., Zinov'eva S.V., Zaytseva T.B. Microbial transformation of microcystine-LR in samples of natural water // *Regionalnaya ekologiya*. 2017. No. 2 (48). P. 56–61 (in Russian).

28. Medvedeva N.G., Zaytseva T.B., Kuzikova I.L., Chernova E.N. Microcystin-LR biodestruction by autochthonous microbiota of different water bodies in the Northwest of Russia // *Biol. Bull.* 2023. V. 50. No. 6. P. 1376–1387. doi: 10.1134/S1062359023600496

29. Korneva L.G., Soloveva V.V. Phytoplankton and cyanotoxin content in the Rybinsk, Gorky and Cheboksary reservoirs during the abnormally hot summer of 2010 // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2014. No. 8. P. 24–29 (in Russian).

30. Petrosyan V.S., Antsiferova G.A., Akimov L.M., Kulnev V.V., Shevyrev S.L., Akimov E.L. Assessment and forecast of the ecological and sanitary condition of the Voronezh reservoir for 2018–2019 // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2019. V. 23. No. 7. P. 52–56 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2019-07-52-56

31. Antsiferova G.A., Shevyrev S.L., Kulnev V.V., Rusova N.I., Galkina E.S. Ecological and sanitary condition of the Voronezh reservoir in the conditions of “bloom-ing” of waters based on the materials of 2016–2022 // *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Nauki o Zemle*. 2023. V. 23. No. 3. P. 147–154 (in Russian). doi: 10.18500/1819-7663-2023-23-3-147-154

32. Drozdenko T.V., Aleksandrova S.M., Antal T.K., Tikhomirova E.I. Structural indicators and toxic species of cyanobacteria of Pskov Lake // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2022. No. 4. P. 388–399 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2022-4-388-399

33. Smirnova V.S., Tekanova E.V., Kalinkina N.M., Chernova E.N. Phytoplankton status and cyanotoxins in the “bloom” spot in Lake Svyatozero (Onega Lake basin, Russia) // *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2021.

No. 1 (85). P. 50–60 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60

34. Voloshko L.N. Cyanobacterial toxins and the other bioactive compound in water bodies of the Leningrad region // *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2016. No. 1 (35). P. 28–35 (in Russian).

35. Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Mukminov M.N. Indication of cyanotoxins in natural waters of the Republic of Tatarstan // *Uchenye zapiski KGAVM im. N.E. Bauman*. 2012. No. 4. P. 341–344 (in Russian).

36. Bespalova K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Drinking water supply under conditions of mass development of blue-green algae on reservoirs // *Vodnoe khozyaystvo Rossii*. 2021. No. 2. P. 121–134 (in Russian). doi: 10.35567/1999-4508-2021-2-9

37. Stepanova N.Yu., Khaliullina L.Yu., Nikitin O.V., Latypova V.Z. Structure and toxicity of cyanobacteria in recreational areas of water bodies of the Kazan region // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2012. No. 11. P. 67–72 (in Russian).

38. Sidelev S.I., Fomichev A.A., Babanazarova O.V., Zubishina A.A. Identification of microcystin-producing cyanobacteria in Upper Volga water bodies // *Mikrobiologiya*. 2013. V. 82. No. 3. P. 370–371 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365613020146

39. Sidelev S.I., Zubishina A.A., Babanazarova O.V., Kutuzova V.Yu., Martyanov O.V. Monitoring the content of microcystin cyanotoxins in Upper Volga water bodies: molecular-genetic and analytical approaches // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2014. No. 8 (74). P. 88–94 (in Russian).

40. Sidelev S.I., Babanazarova O.V. Detection of cyanobacterial toxins in water supply sources and tap water of some Russian cities: search for producers and approbation of removal methods // *Vodnye resursy*. 2020. V. 47. No. 2. P. 218–229 (in Russian). doi: 10.31857/S0321059620020182

41. Sidelev S.I., Korneva L.G., Solovyeva V.V., Zubishina A.A., Pligin D.N. Molecular genetics identification and seasonal dynamics of toxigenic cyanobacteria in phytoplankton of the Rybinsk Reservoir (Russia) // *Biologiya vnutrennikh vod*. 2016. No. 4. P. 37–44 (in Russian).

42. Sidelev S.I., Golokolenova T.B., Chernova E.N., Russkikh I.V. Analysis of phytoplankton in Tsimlyansk Reservoir (Russia) for the presence of cyanobacterial hepatotoxic and neurotoxins // *Mikrobiologiya*. 2015. V. 84. No. 6. P. 732–742 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365615060130

43. Korneva L.G., Solovyeva V.V., Sidelev S.I., Chernova E.N., Russkikh Y.V. Ecology and metabolic activity of cyanobacteria in large different types of lowland reservoirs in the European part of Russia // *Voprosy sovremennoi algologii (Issues of modern algology)*. 2021. No. 2 (26). P. 29–37 (in Russian). doi: 10.33624/2311-0147-2021-2(26)-29-37

44. Toporowska M., Pawlik-Skowrońska B., Kalinowska R. Mass development of diazotrophic cyanobacteria (Nostocales) and production of neurotoxic anatoxin-a in a *Planktothrix* (Oscillatoriales) dominated temperate lake // *Water Air Soil Pollut*. 2016. V. 227. Article No. 321. doi: 10.1007/s11270-016-3004-y

45. Ballot A., Scherer P.I., Wood S.A. Variability in the anatoxin gene clusters of *Cuspidothrix issatschenkoii* from Germany, New Zealand, China and Japan // *PLoS One*. 2018. V. 13. No. 7. P. e0200774. doi: 10.1371/journal.pone.0200774

46. Karosienė J., Savadova-Ratkus K., Toruńska-Sitarz A., Koreivienė J., Kasperovičienė J., Vitonytė I., Błaszczuk A., Mazur-Marzec H. First report of saxitoxins and anatoxin-a production by cyanobacteria from Lithuanian lakes // *Eur. J. Phycol.* 2020. V. 55. No. 3. P. 327–338. doi: 10.1080/09670262.2020.1734667

47. Stoyneva-Gärtner M., Stefanova K., Uzunov B., Radkova M., Gärtner G. *Cuspidothrix* is the first genetically proved anatoxin A producer in Bulgarian lakes and reservoirs // *Toxins*. 2022. V. 14. No. 11. Article No. 778. doi: 10.3390/toxins14110778

48. Kuz N.V., Sinitsyna O.O., Turbinskiy V.V. Results of the study of embryotoxic effect of cyanotoxin anatoxin-a // *Health Risk Analysis – 2023*. In conjunction with the international meeting on environment and health RISE-2023: materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: v 2 tomah / Eds. A.Yu. Popova, N.V. Zaytseva. Perm: Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2023. V. 2. P. 69–74 (in Russian).