

Токсичные цианобактерии и их метаболиты в водоёмах Северо-Запада России

© 2020. Е. Ю. Воякина, к. б. н., с. н. с, Я. В. Русских, к. х. н., с. н. с,
Е. Н. Чернова, к. х. н., с. н. с, З. А. Жаковская, к. б. н., зав. отделом,
ФГБУН Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической
безопасности Российской академии наук (НИЦЭБ РАН),
197110, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Корпусная, д. 18,
e-mail: katerina.voyakina@gmail.com

В последние десятилетия проблема «вредоносного цветения водорослей» давно уже стала актуальной для водоёмов Северо-Запада России. Впервые в России в ходе одного исследования были получены данные о распространении цианобактерий, их составе и концентрации цианотоксинов в ряде эвтрофных водоёмов на Северо-Западе России. В период исследования (2008–2018 гг.) в озёрах Сестрорецкий Разлив и Нижнее Суздальское в Санкт-Петербурге в период активной вегетации цианобактерий детектировано присутствие микроцистинов и нейротоксичного анатоксина-а. Виды *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralf et Born et Flah., *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom., species of *Microcystis* (*M. aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *M. wesenbergii* Kom., *M. viridis* (A. Br.) Lemm.) доминировали в планктоне в период вегетации. Впервые в России были выявлены виды-продуценты микроцистинов в Финском заливе. Получены данные о продуцировании анатоксина-а в Финском заливе видом *A. flos-aquae*, часто доминирующим в Балтийском море и нетоксичным. В Псковско-Чудском озере России установлено присутствие токсичных видов цианобактерий и детектировано присутствие микроцистинов.

Ключевые слова: цианобактерии, цианотоксины, эвтрофные водоёмы, альгоценозы, массовые виды, хромато-масс-спектрометрия.

Toxic cyanobacteria and their metabolites in the lakes of the Russian Northwest

© 2020. E. Ju. Voyakina ORCID: 0000-0003-4620-5864
Ya. V. Russkikh ORCID: 0000-0003-1762-3055
E. N. Chernova ORCID: 0000-0002-2135-4540
Z. A. Zhakovskaya ORCID: 0000-0002-5620-1317
Saint-Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety,
Russian Academy of Sciences,
18, Korpusnaya St., St. Petersburg, Russia, 197110,
e-mail: katerina.voyakina@gmail.com

In recent decades, cyanobacterial blooms have also been reported from water bodies located in the Northwest of Russia. For the first time in Russia, in one study, data were obtained on the distribution of cyanobacteria and the composition and concentration of cyanotoxins in a number of eutrophic water bodies in Northwest of Russia. The active vegetation of cyanobacteria was noted in these water bodies. The study of the toxin determination has been carried out using method of high-performance liquid chromatography – tandem mass-spectrometry on LTQ OrbiTrap instrument (“Finnigan”) with linear and orbital traps in the electrospray-ionization (ESI+). The characteristic mass-spectra of analytes have been registered using high-resolution mass-spectrometry and tandem mass-spectrometry. Two eutrophic lakes (Lake Sestroretskiy Razliv and Lake Suzdalskoe) were investigated in the warm period from June to September of 2008–2018. The important contribution to the phytoplankton was made by cyanobacteria (more than 90% of total abundance). *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralf et Born et Flah., *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom., species of *Microcystis* (*M. aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *M. wesenbergii* Kom., *M. viridis* (A. Br.) Lemm.) were dominated in plankton during the period of investigation. Maximum concentration of microcystins (8.2 mkg/L) was noted in middle of July 2014 in Lake Sestroretskiy Razliv. Maximum concentration of anatoxin-a (1.7 mkg/L) was also marked in July 2014 in Lake Suzdalskoe. Data were obtained on the production of toxoid in the Gulf of Finland by the species *Aphanizomenon flos-aquae*, which is often dominant and non-toxic in the Baltic Sea. For the first time in Russia, species-producers of microcystins in the Gulf of Finland were identified. The presence of toxic types of cyanobacteria was established in the Peipsi Lake (Pskovsko-Chudskoe) in some reservoirs of the European North of Russia, and the presence of microcystins was detected.

Keywords: cyanobacteria, cyanotoxins, eutrophic water bodies, algal communities, dominant species, mass spectrometry.

«Цветение» водорослей и цианобактерий (ВЦВ) признано одной из актуальных проблем современного мира в связи с его негативным воздействием на водные объекты и водопользователей [1–5]. В большинстве стран Евросоюза, в США, Канаде и Австралии разработаны национальные программы по мониторингу «цветения». Причины, вызывающие «цветение» воды, очевидны (благоприятные погодные условия и наличие в воде избыточного количества биогенных элементов) [2–5]. Механизмы «цветения» мало изучены, и эффективных методов их устранения пока нет. В России, в том числе на Северо-Западе, также существуют экологические проблемы, вызванные «цветением» водоёмов [6]. В настоящее время «цветут» практически все водоёмы Северо-Запада России. «Цветёт» Ладожское озеро, которое служит источником водоснабжения г. Санкт-Петербурга, активная вегетация цианобактерий наблюдается в Балтийском море. Большие проблемы для жителей г. Сестрорецка создаёт регулярное «цветение» водохранилища Сестрорецкий Разлив [6].

Цианобактерии (синезелёные водоросли, цианопрокариоты) отличаются высокой способностью к адаптации, распространены практически повсеместно, могут находиться во всех экосистемах от наземных до водных сред обитания, в том числе и в экстремальных условиях. На сегодняшний день установлено, что 46 видов цианобактерий способны продуцировать токсичные метаболиты (цианотоксины), которые представляют опасность для здоровья людей и животных. Из цианобактерий, формирующих «цветение» воды и выделяющих токсины, особого внимания заслуживают роды *Microcystis*, *Anabaena*, *Planktothrix*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Phormidium*, *Nostoc*, *Anabaenopsis* и *Nodularia* [6–8].

До недавнего времени информация по цианотоксинам и видовому составу цианобактерий для водоёмов Европейской части РФ практически отсутствовала. Это направление исследований только недавно начало развиваться в Российской Федерации [9–11].

Подробные исследования сезонной динамики цианобактерий и их метаболитов на Северо-Западе РФ, в том числе в водоёмах г. Санкт-Петербурга, были начаты НИЦЭБ РАН ещё в 2008 г. Исследование проводили на пресноводных акваториях, различающихся по лимнологическим параметрам, трофическому статусу (от мезотрофных до гиперэвтрофных), структуре фитопланктона, спектру и концентрации цианотоксинов. Наиболее

интересные данные были получены для водоёмов г. Санкт-Петербурга со значительной рекреационной нагрузкой (оз. Сестрорецкий Разлив и оз. Нижнее Суздальское) [10, 11]. В последнее время (2015–2018 гг.) был расширен ареал исследований. Было проведено исследование структуры альгоценозов и цианотоксинов в воде и биомассе цианобактерий в озере Псковско-Чудское и прибрежной зоне восточной части Финского залива.

Цель работы – оценка содержания цианотоксинов в различных акваториях Северо-Запада России в зависимости от структурных показателей цианобактерий.

Материалы и методы

В работе приведены результаты исследования водоёмов, расположенных на Северо-Западе России, с активной вегетацией цианобактерий. Отбор проб в озёрах Сестрорецкий разлив и Нижнее Суздальское осуществляли с июня по сентябрь в 2008–2018 гг. В восточной части Финского залива исследования проводили в основном на акватории прибрежной зоны Курортного района в июне – августе 2015 и 2018 гг. В Псковско-Чудском озере пробы отбирали эпизодически в июле–августе 2017–2018 гг.

Количественные пробы фитопланктона объёмом 1 л отбирали с поверхности воды. Для фиксации проб фитопланктона использовали кислый раствор Люголя в модификации Усачёва. Биомассу фитопланктона определяли общепринятым способом с учётом того, что 10^9 мкм³ соответствует 1 мг сырой биомассы. За счётную единицу принимали клетку. Объём водорослей устанавливали методом геометрического подобия.

Для определения профиля цианобактериальных токсинов и их количественного определения использовался метод высокоэффективной жидкостной хроматографии – масс-спектрометрии высокого разрешения (ВЭЖХ-МС-ВР) (LTQ OrbiTrap («Finnigan»), ESI+) [10, 11].

Объектами исследования были водоёмы с высоким уровнем трофии. Озеро Сестрорецкий Разлив – самый крупный водоём в черте г. Санкт-Петербурга. Озеро расположено в пределах водосборного бассейна и в непосредственной близости от Финского залива. На водосборной площади располагается государственный природный заказник «Сестрорецкое болото». Высокая цветность воды (до 220 °Pt-Сo шкале) и значительное содержание взвешенных веществ как автохтонной, так и

аллохтонной природы обуславливают невысокие значения прозрачности воды (менее 0,3 м).

Нижнее Суздальское озеро – самый большой водоём в системе Суздальских озёр. Для гидрохимического режима оз. Нижнее Суздальское характерны более щелочная реакция воды (7,4–9,4 ед.) и более узкие диапазоны биогенных элементов по сравнению с оз. Сестрорецкий Разлив. Наибольший диапазон был отмечен для общего фосфора (0,012–0,350 мг/л). Суздальские озёра испытывают значительное антропогенное влияние вследствие поступления хозяйственно-бытовых сточных вод.

Псковско-Чудское озеро относится к бассейну Балтийского моря Атлантического океана. Водоём проточный, подвержен процессам интенсивного эвтрофирования с семидесятых-восьмидесятых годов прошлого века. Вода в озере пресная, слабо минерализованная и имеет малую прозрачность (до 2,5 м), что объясняется значительным количеством взвешенных частиц, приносимых реками, а также развитием планктона [12].

Финский залив, расположенный в восточной части Балтийского моря – это трансграничный водный объект Финляндии, России и Эстонии. Залив относительно неглубокий, с уменьшением глубины от входа в залив до континента. Средняя глубина – 38 м, максимальная – 100 м. Вода залива имеет очень низкую солёность – от 0,2 до 5,8 ‰ на поверхности и 0,3–8,5 ‰ около дна. Эта акватория может быть отнесена к эвтрофным водам [13].

Пресноводные виды цианобактерий обычно встречаются в планктоне во внутреннем устье Финского залива. Во внешнем устье Финского залива распространены виды (*Nodularia spumigena* Mert. ex Born. & Flah., *Dinophysis* sp.), характерные для солоноватых вод [13].

Результаты и обсуждение

Озера Сестрорецкий Разлив и Нижнее Суздальское. Для водоёмов, расположенных в черте г. Санкт-Петербурга – озёра Сестрорецкий Разлив и Нижнее Суздальское – в период максимального прогрева воды (июль–август) были характерны высокие значения биомассы фитопланктона (табл.). Среднесезонные значения биомассы варьировали от 11,4±3,1 до 42,9±24,4 мг/л. Большую часть сезона по численности доминировали цианобактерии, на их долю приходилось более 90% от общей численности. В озёрах доминировали токсигенные виды цианобактерий (*Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralf et Born et Flah., виды рода *Microcystis*, *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom.). В разные годы в сезонной динамике фитопланктона в оз. Сестрорецкий Разлив чаще всего было характерно наличие одного пика, связанного с вегетацией диатомовых водорослей и цианобактерий. В оз. Нижнее Суздальское пик вегетации фитопланктона был обусловлен активной вегетацией цианобактерий и динофитовых водорослей.

Таблица / Table

Показатели обилия фитопланктона, доминирующие виды цианобактерий и токсинов в исследованных водоёмах
Abundance and biomass of phytoplankton, dominant species of cyanobacteria and toxins in the studied water bodies

Водоём Water bodies	Численность, млн кл./л Abundance, mln. cell/L	Биомасса, мг/л Biomass, mg/L	Доминирующие виды цианобактерий / Dominant species of cyanobacteria
Оз. Сестрорецкий Разлив Lake Sestroretskiy Razliv	178,9±25,4 (3,2–849,6)	22,1±3,0 (1,6–188,8)	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> <i>Planktothrix agardhii</i> <i>Microcystis aeruginosa</i> <i>M. viridis</i> <i>M. wesenbergii</i>
Оз. Нижнее Суздальское Lake Suzdalskoe	127,7±17,5 (3,3–400,3)	47,9±20,4 (2,3–1112,6)	<i>A. flos-aquae</i> <i>M. aeruginosa</i> <i>P. agardhii</i>
Оз. Псковско-Чудское Lake Pskovsko- Chudskoe	148,4±33,6 (64,8–205,5)	1,5±0,8 (0,48–2,39)	<i>Planktolyngbya limnetica</i> <i>Aphanocapsa</i> spp. <i>Woronichinia compacta</i>
Финский залив Gulf of Finland	211,7±65,1 (20,5–395,4)	19,1±6,3 (2,4–39,3)	<i>Aphanocapsa planctonica</i> <i>A. flos-aquae</i> <i>M. aeruginosa</i> <i>P. agardhii</i> <i>Dolichospermum</i> spp.

В пробах природной воды и биомассы из этих озёр при доминировании потенциально токсигенных видов цианобактерий ежегодно обнаруживали микроцистины (табл.). Всего было идентифицировано 20 структурных вариантов микроцистинов и анабаенопептины. Наибольший вклад вносили микроцистины MC-RR, MC-LR и MC-YR, их деметилированные варианты, также были детектированы и редко встречаемые [D-Glu-OCH₃6]MC-LR, [D-Asp₃, Dha7]MC-RR, [Dha7]MC-FR, MC-(H₄)-YR, MC-WR, [D-Asp₃, Dha7]MC-YR, [D-Asp₃]MC-WR, MC-LW. В летний период неоднократно регистрировалось и присутствие нейротоксичного анатоксина-а. Концентрация и количество структурных форм токсинов зависели от состава и уровня вегетации цианобактерий.

Максимальная концентрация микроцистинов в воде была отмечена в июле 2014 г. в оз. Сестрорецкий Разлив (8,2 мкг/л). В летний период в 2010–2015 гг. и в августе 2018 г. в оз. Нижнее Суздальское основным видом был *Aphanizomenon flos-aquae* и в это же время был отмечен в воде анатоксина-а. Его максимальные концентрации наблюдались в июле 2014 г. (1,7 мкг/л). Данная концентрация превышала величину допустимого содержания в питьевой воде, установленную в ряде стран (США, Новая Зеландия) [14–15].

В 2017 г. для улучшения экологической ситуации в озере Сестрорецкий Разлив ГосНИОРХ выпустил 1,5 тонны толстолобика, что не могло не сказаться на состоянии биоты этого водоёма. Показатели обилия фитопланктона резко снизились, активной вегетации цианобактерий и значительных концентраций цианотоксинов также не было обнаружено. В 2018 г. вновь была отмечена активная вегетация цианобактерий. Численность фитопланктона варьировала от 23,4 до 400,1 млн кл./л (среднее значение было 147,3±51,3 млн кл./л), а биомасса – от 7,9 до 44,0 мг/л (среднее значение – 19,5±4,4 мг/л). В июне – июле и начале августа лидировал *A. flos-aquae*, в августе – *Planktothrix agardhii*, а в сентябре – октябре – виды из рода *Microcystis*. В период доминирования *A. flos-aquae* отмечали достаточно низкие величины содержания внутриклеточных и внеклеточных микроцистинов (0,03–3,3 мкг/л). В начале августа, когда в планктоне стали активно вегетировать виды рода *Microcystis* и *P. agardhii* наблюдалось увеличение содержания микроцистинов. В этот период детектирована их максимальная концентрация (3,3 мкг/л) и наибольшее количество структурных вариантов (13).

Наибольший вклад вносили микроцистины MC-RR, MC-LR, MC-YR и их деметилированные варианты. Содержание наиболее токсичного MC-LR в течение сезона составляло 0,005–0,36 мкг/л.

В 2018 г. в оз. Нижнее Суздальское численность фитопланктона варьировала от 17,0 до 245,0 млн кл./л, а биомасса – от 6,9 до 29,3 мг/л. Средневегетационное значение биомассы составляло 17,0±2,7 мг/л. В сезонной динамике фитопланктона прослеживался обширный летний максимум (июнь – начало августа). Как и в оз. Сестрорецкий Разлив, здесь тоже большую часть сезона доминировали *Aphanizomenon flos-aquae*, *P. agardhii*, *M. aeruginosa*. Минимальное содержание внутриклеточных токсинов было детектировано в конце мая (0,03 мкг/л), максимальное – в конце августа (6,9 мкг/л). Концентрация наиболее токсичного MC-LR менялось в диапазоне 0,006–1,04 мкг/л, с максимумом в конце августа. Кроме того, в летний период в фитопланктоне неоднократно регистрировалось присутствие нейротоксичного анатоксина-а (0,01–0,61 мкг/л), когда доминировали *P. agardhii* и *A. flos-aquae* – вероятные продуценты нейротоксинов (табл.).

Прибрежная зона восточной части Финского залива. В прибрежной зоне восточной части Финского залива эпизодически наблюдались резкие вспышки цианобактериального «цветения» воды с экстремально высокими концентрациями цианотоксинов как в воде, так и в биомассе. В сентябре 2015 г. в пробах воды прибрежной зоны восточной части Финского залива в Курортном районе наблюдалась активная вегетация цианобактерий (численность – 20,5 млн кл./л, биомасса – 2,4 мг/л). В планктоне доминировали виды *Aphanocapsa planctonica* (Smith) Kom. & Anag., *Microcystis aeruginosa*, *P. agardhii*, виды рода *Dolichospermum*. Как следствие, были обнаружены высокие концентрации микроцистинов (более 40,0 мкг/л), превышающие в два раза уровни содержания в рекреационных водах, рекомендованные ВОЗ (20 мкг/л) [16]. Кроме того, в них детектировано и присутствие анатоксина-а (0,6 мкг/л).

В конце августа 2018 г. в Финском заливе в районе Зеленогорска и Репино были отмечены случаи массовой вегетации цианобактерий. Численность изменялась от 219,6 до 395,4 млн кл./л, биомасса – 15,5–39,3 мг/л. Основными видами были потенциально токсичные – *A. flos-aquae*, виды

рода *Dolichospermum* и *P. agardhii*. В пробах воды и биомассы было зарегистрировано присутствие микроцистинов. В пробе биомассы в районе Зеленогорска было идентифицировано 6 структурных вариантов МС. Их суммарное содержание составляло 54 мкг/г лиофилизированной биомассы, причём наибольший вклад вносили широко распространённые аргинин-содержащие варианты: МС-LR (15,26 мкг/г), МС-RR (11,63 мкг/г). Содержание внеклеточных форм микроцистинов в пробе воды составляло 1,90 мкг/л. Наибольшие концентрации были установлены для МС-LR (0,61 мкг/л) и МС-RR (0,61 мкг/л).

Пробы биомассы из Финского залива вблизи п. Репино отличались большим разнообразием структурных вариантов микроцистинов (11 структур). Однако суммарное содержание внутриклеточных микроцистинов (23,03 мкг/г лиофилизированной биомассы) было ниже по сравнению с пробой, отобранной в районе Зеленогорска. Максимальный вклад (14,20 мкг/г) вносил МС-LR. Содержание внеклеточной фракции микроцистинов в воде составляло лишь 0,02 мкг/л. Впервые было проведено качественное и количественное обнаружение анатоксина-а в Финском заливе [11]. Скорее всего, потенциальным продуцентом этого токсина может быть *Aphanizomenon flos-aquae*, но для проверки этого предположения требуется использование ПЦР анализа.

Псковское и Чудское озёра. В 2017–2018 гг. в Псковском и Чудском озёрах были отобраны пробы воды на станциях с визуальными признаками «цветения». Отличительная черта вегетации цианобактерий в озёрах Псковское и Чудское – это высокие значения численности при невысоких значениях биомассы из-за преобладания в планктоне мелкоклеточных форм (табл.). В период исследования наибольшую роль в планктоне играли *Planktolyngbya limnetica* (Lemm.) Kom.-Legner. & Cronq., а также виды родов *Aphanocapsa* и *Woronichinia*. Доля цианобактерий в общей численности превышала 90%. В июле в пробах воды Чудского озера внеклеточных токсинов детектировано не было, а в воде из Псковского озера детектировано наличие наиболее токсичного представителя микроцистинов МС-LR, его концентрация варьировала от 0,03 до 0,09 мкг/л. В середине августа 2017 г. в пробах воды из Псковского озера было идентифицировано 5 структурных вариантов микроцистинов, их суммарное содержание составило 0,22 мкг/л, причём основной вклад опять вносил МС-LR. Несмотря на то, что 2018 г.

был тёплым и солнечным, в исследованных озёрах отмечено только эпизодическое «цветение» воды, и содержание цианотоксинов было незначительно. Суммарное содержание внутриклеточных микроцистинов составило 0,02–0,21 мкг/л. Максимальная концентрация была отмечена в Псковском озере. В пробах биомассы детектировано 9 аргинин-содержащих структурных вариантов микроцистинов. Присутствие нейротоксичных анатоксина-а и сакситоксинов в пробах воды и биомассы не зарегистрировано.

Заключение

Таким образом, впервые в России временно получены данные о содержании цианобактерий и выделяемых ими цианотоксинов в разнотипных водоёмах на Северо-Западе РФ. Аналогичных работ в России ранее не проводилось. Для исследованных акваторий характерно доминирование в летний период потенциально токсичных цианобактерий. Наибольшие значения показателей обилия цианобактерий наблюдались в озёрах в черте г. Санкт-Петербурга (Сестрорецкий Разлив и Нижнее Суздальское) (табл.). Использование в работе разработанных нами методик масс-спектрометрического анализа цианотоксинов различных классов позволило оценить не только суммарное содержание токсинов, что достаточно часто встречается в работах такого рода, но и определить индивидуальные варианты структур. Полученные результаты показывают, что уровень детектируемых токсинов и их спектр в водоёмах России соответствуют данным, полученным для других стран [4].

В целом в воде и в фитопланктоне в разнотипных водоёмах г. Санкт-Петербурга (оз. Нижнее Суздальское и Сестрорецкий Разлив) идентифицировано 20 структурных вариантов микроцистинов, их концентрация в летний период представляет угрозу для здоровья населения. Впервые проведён поиск цианотоксинов в прибрежной зоне восточной части Финского залива, в Псковском и Чудском озёрах. В воде восточной части Финского залива обнаружено 11 различных структурных вариантов микроцистина, а в Псковско-Чудском – 9 аргинин-содержащих структурных вариантов микроцистинов. Показано, что разнообразие и концентрации цианотоксинов в связи с составом доминирующих видов цианобактерий и уровнем вегетации. Исследование акваторий требует пристального дальнейшего внимания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-04-01069. Статья опубликована при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-04-20031.

References

1. WHO. Guidelines for Drinking Water Quality. 4th ed: World Health Organization. 2011.
2. Falconer I.R. An overview of problems caused by toxic blue-green algae (cyanobacteria) in drinking and recreational water // *Environ. Toxicol.* 1999. No. 14. P. 5–12.
3. Carmichael W.W. Health effects of toxins – producing cyanobacteria: “The cyanobacteria” // *Hum. Ecol. Risk Assess.* 2001. V. 7. P. 1393–1407.
4. Pawlic-Skowronska B., Skowronski T., Pirszel J., Adamczyk A. Relationship between cyanobacterial bloom composition and anatoxin-a and microcystin occurrence in the eutrophic Dam reservoir (se Poland) // *Pol. J. Ecol.* V. 52 (4). 2004. P. 479–490.
5. Wood S.A., Stirling D.J., Briggs L.R., Sprosen J., Holland P.T., Ruck J.G., Wear R.G. Survey of cyanotoxins in New Zealand waterbodies between 2001 and 2004 // *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research.* 2006. V. 40. No. 4. P. 585–597. doi: 10.1080/00288330.2006.9517447
6. Bloom-forming algae in water bodies of Northwestern of Russia. Moskva: KMK, 2006. 367 p. (in Russian).
7. Codd G.A., Morrison L.F., Metcalf J.S. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection // *Toxicology and Applied Pharmacology.* 2005. V. 203. P. 264–272. doi: 10.1016/j.taap.2004.02.016
8. Patova E.N. Cyanoprokaryotic “flowering” of water bodies of the East European tundra (floristic and functional aspects) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2007. No. 3. P. 4–10 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2007-3-004-010
9. Sidelev S.I., Golokolenova T.B., Chernova E.N., Russkikh I.V. Analysis of phytoplankton in Tsimlyansk Reservoir (Russia) for the presence of cyanobacterial hepato- and neurotoxins // *Microbiology.* 2015. V. 84. P. 828–837. doi: 10.7868/S0026365615060130
10. Chernova E., Russkikh I.A., Voyakina E., Zhakovskaya Z. Occurrence of microcystins and anatoxin-a in eutrophic lakes of Saint Petersburg, northwestern Russia // *Oceanological and hydrobiological studies.* 2016. V. 45. No. 4. P. 466–484. doi: 10.1515/ohs-2016-0040
11. Chernova E., Sidelev S., Russkikh I.A., Voyakina E., Zhakovskaya Z. First observation of microcystin- and anatoxin-a-producing cyanobacteria in the easternmost part of the Gulf of Finland (the Baltic Sea) // *Toxicon.* 2019. V. 157. P. 18–24. doi: 10.1016/j.toxicon.2018.11.005
12. Sokolov A.A. Hydrography of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1952. 287 p. (in Russian).
13. Nikulina V.N., Gubelit, Yu.I. Cyanobacteria and macroalgae in ecosystem of the Neva estuary // *Knowl. Manage. Aquat. Ecosyst.* 2011. V. 402. No. 6. P. 1–12. doi: 10.1051/kmae/2011049
14. Burch M.D. Effective doses, guidelines & regulations // *Advances in Experimental Medicine and Biology.* 2008. V. 619. P. 831–853.
15. Farrer D., Counter M., Hillwig R., Cude C. Health-based cyanotoxin guideline values allow for cyanotoxin-based monitoring and efficient public health response to cyanobacterial blooms // *Toxins.* 2015. V. 7. P. 457–477. doi: 10.3390/toxins7020457
16. Guidelines for safe recreational water environments. V. 1: Coastal and fresh waters. Geneva: World Health Organization, 2003. 253 p.