

Турбинский В.В.¹, Брагина И.В.², Кузь Н.В.^{1,3}, Синицына О.О.¹, Пушкарева М.В.¹

Проблема цветения воды источников питьевого водоснабжения населения

¹ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 141014, Мытищи, Россия;²Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 127994, Москва, Россия;³ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Москве», 129626, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Источник питьевого водоснабжения Челябинска с населением более 1 млн человек — река Миасс, сток которой зарегулирован Шеринёвским и Аргазинским водохранилищами. Воды водохранилищ регионов периодически подвержены усиленному цветению, в том числе цианобактериальному, что создаёт высокую опасность их воды для здоровья населения и требует специального мониторинга.

Материалы и методы. Объектами исследований служили природная вода р. Миасс на Шеринёвском водохранилище в створе станции водоподготовки МУП ПОВВ «Сосновские водоочистные сооружения» Челябинска и очищенная питьевая вода перед подачей в разводящую сеть. Использованы результаты лабораторно-инструментальных исследований биомассы фитопланктона, количественного и качественного (видового состава) цианобактерий за 2010–2022 гг. Определение цианотоксинов микроцистина-LR, цилиндропермопсина, анатоксина-а, сакситоксина и бета-N-метиламин-L-аланина (БМАА) в воде водохранилища и питьевой воде, подаваемой населению, проводили с использованием готовых иммуноферментных тест-систем производства Eurofins Abraxis (США) методом иммуноферментного анализа.

Результаты. В воде Шеринёвского водохранилища выявлены доминирующие рода цианобактерий: *Planktothrix*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* и *Anabaena*. В результате мониторинга воды Шеринёвского водохранилища и питьевой воды обнаружены продуцируемые цианобактериями токсины: микроцистин-LR, анатоксин-а, сакситоксин, цилиндропермопсин и β-N-метиламино-L-аланин (БМАА). Анализ качественного и количественного состава цианобактерий и цианотоксинов позволил выявить характерные для данного региона тенденции «цветения» воды, недостаточную эффективность двухступенчатой схемы очистки в отношении анатоксина-а, цилиндропермопсина, сакситоксина, микроцистина-LR.

Ограничения исследования. Отсутствие отечественных стандартов и тест-систем с необходимой чувствительностью и репрезентативностью, позволяющих расширить спектр определяемых приоритетных цианотоксинов в воде.

Заключение. Выявлены региональные особенности и сезонные закономерности распространения последствий цианобактериального «цветения». Направлением дальнейших исследований может стать совершенствование систем водоподготовки питьевой воды и очистки сточных вод. Полученные результаты могут быть положены в основу разработки системы мониторинга, в том числе выявления приоритетных цианотоксинов и оценки риска для здоровья населения.

Ключевые слова: «цветение» воды; фитопланктон; синезелёные водоросли; цианобактерии; цианотоксины; анатоксин-а; небелковая кислота бета-N-метиламин-L-аланин; сакситоксин; цилиндропермопсин; микроцистин-LR; мониторинг; питьевая вода

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике.

Для цитирования: Турбинский В.В., Брагина И.В., Кузь Н.В., Синицына О.О., Пушкарева М.В. Проблема цветения воды источников питьевого водоснабжения населения. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(12): 1466–1472. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-12-1466-1472> <https://elibrary.ru/fwvkpd>

Для корреспонденции: Кузь Надежда Валентиновна, e-mail: Nadezhda.v.k@gmail.com

Участие авторов: Турбинский В.В., Пушкарева М.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Брагина И.В. — концепция и дизайн исследования; Кузь Н.В. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста; Синицына О.О. — концепция и дизайн исследования, редактирование. Все соавторы — ответственность за целостность всех частей, утверждение окончательного варианта статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках реализации государственной программы «Обеспечение химической и биологической безопасности Российской Федерации» на 2021–2024 гг.

Поступила: 17.10.2024 / Поступила после доработки: 13.12.2024 / Принята к печати: 17.12.2024 / Опубликовано: 28.12.2024.

Viktor V. Turbinsky¹, Irina V. Bragina², Nadejda V. Kuz^{1,2}, Oxana O. Sinitsyna¹,
Mariya V. Pushkareva¹

The problem of algal bloom in the source of drinking water supply for the population

¹Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation;²Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, Moscow, 127994, Russian Federation;³Center of Hygiene and Epidemiology in Moscow, Moscow, 129626, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The source of drinking water supply for the city of Chelyabinsk with a population of more than 1 million people is the Miass River, the flow of which is regulated by the Shershnevskoye and Argazinskoye reservoirs. The waters of these reservoirs are periodically subjected to increased blooming, including cyanobacterial blooming, which makes the water hazardous to human health, requiring special monitoring.

Materials and methods. The objects of research were natural water of the river. The objects of the research were natural water of the Miass River at the Shershnevskoye water reservoir in the water treatment station of the municipal unitary enterprise for water supply and sanitation industrial association “Sosnovskiy water treatment facilities” in Chelyabinsk and treated drinking water before supplying to the distribution network. The results of laboratory-instrumental studies of phytoplankton biomass, quantitative, and qualitative (species composition) of cyanobacteria for 2010–2022 were used. Determination of cyanotoxins microcystin-LR, cylindrospermopsin, anatoxin-a, saxitoxin, and beta-N-methylamine-L-alanine (BMAA) in reservoir water and drinking water supplied to the population was carried out using ready-made immunoenzyme test systems, manufactured by Eurofins Abraxis (USA) by enzyme immunoassay method.

Results. The dominant genera of cyanobacteria identified in the water of the Shershnev Reservoir were: *Planktothrix*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, and *Anabaena*. As a result of monitoring the water of the Shershnev Reservoir and drinking water there were detected following toxins produced by cyanobacteria: microcystin-LR, anatoxin-a, saxitoxin, cylindrospermopsin, microcystin, and β -N-methylamino-L-alanine (BMAA). The analysis of qualitative and quantitative composition of cyanobacteria and cyanotoxins allowed revealing the tendencies of “blooming” processes characteristic for this region, insufficient efficiency to the two-stage purification scheme in relation to: anatoxin-a, cylindrospermopsin, saxitoxin, and microcystin-LR.

Limitation. Lack of domestic standards and test systems with the necessary sensitivity and representativeness to expand the range of determined priority cyanotoxins in water.

Conclusion. Regional peculiarities and seasonal patterns of distribution of the consequences of cyanobacterial “blooms” have been revealed. The direction of further research may be the improvement of wastewater treatment systems and drinking water treatment systems. The obtained results can be used as a basis for development of monitoring system, including identification of priority cyanotoxins and assessment of public health risk.

Keywords: water “bloom”; phytoplankton; blue-green algae; cyanobacteria; cyanotoxins; anatoxin-a; non-protein acid beta-N-methylamine-L-alanine; saxitoxin; cylindrospermopsin; microcystin-LR; monitoring; drinking water

Compliance with ethical standards. This study does not require the conclusion of a biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Turbinsky V.V., Bragina I.V., Kuz N.V., Sinitsyna O.O. The problem of algal bloom in a source of drinking water supply to the population. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2024; 103(12): 1466–1472. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-12-1466-1472> <https://elibrary.ru/fvwkpd> (In Russ.)

For correspondence: Nadezhda V. Kuz, e-mail: Nadezhda.v.k@gmail.com

Contribution: Turbinsky V.V., Pushkareva M.V. – research concept and design, text writing, editing; Bragina I.V. – concept and design of the study; Kuz N.V. – concept and design of the study, collection and processing of material, text writing; Sinitsyna O.O. – concept and design of the study, editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study was carried out as part of the implementation of the state program “Ensuring the chemical and biological safety of the Russian Federation” for 2021–2024.

Received: October 17, 2024 / Revised: December 13, 2024 / Accepted: December 17, 2024 / Published: December 28, 2024

Введение

Челябинск, столица Южного Урала, расположен в третьем климатическом поясе России. По данным Росстата на 01.01.2023 г., численность населения в Челябинске составляет 1 130 273 человека. Единственным поверхностным источником питьевого водоснабжения для населения Челябинска служит р. Миасс, сток которой зарегулирован Шершнёвским и Аргазинским водохранилищами [1]. Шершнёвское водохранилище построено на Миассе и введено в эксплуатацию в 1969 г. Река Миасс маловодна, при этом территории водосбора являются источниками поступления загрязняющих веществ в водохранилище. Так, выше по течению Шершнёвского водохранилища расположены крупные источники загрязнения, такие как очистные сооружения Миасса в пос. Селянкино, стоки г. Карабаш в р. Сак-Элга, а также неконтролируемые стоки многочисленных сельскохозяйственных предприятий и населённых пунктов Челябинской области, расположенных по берегам Миасса [2].

Шершнёвское водохранилище – водоём мелководный, около 50% площади занимают глубины до четырёх метров, имеются многочисленные плёсы [3]. Прибрежная зона водохранилища активно используется, здесь расположены быстро развивающиеся населённые пункты (посёлки Полетаево, Бутаки, Смолино, Сосновка, Западный, Шершни), восемь коллективных садов, несколько пляжей, три кладбища. С северо-запада к водохранилищу непосредственно примыкает Челябинск. В последние годы наблюдается интенсивная застройка водоохранной зоны и прибрежной полосы Шершнёвского водохранилища [4]. Это приводит к увеличению антропогенной нагрузки, которая ухудшает экологическое состояние водоёма. Прогрессирует эвтрофикация водоёма, наблюдается долгосрочное снижение качества воды в Шершнёвском водохранилище, вызванное снижением качества стока с общего и местного водосборов [5].

Многолетняя динамика содержания биогенных веществ в воде Шершнёвского водохранилища в период половодья и межени с 1972 по 2020 г. свидетельствует о постепенном возрастании концентрации фосфатов: если в первые десятилетия эксплуатации водохранилища содержание фосфат-ионов колебалось в диапазоне 0,04–0,2 мг/дм³, то с 2010 г. отмечен значительный рост, и в настоящее время концентрация фосфатов в среднем составляет 0,3 мг/дм³, а пределы колебаний достигают 0,08–0,6 мг/дм³. Полученные данные свидетельствуют о тенденции постепенного накопления в воде Шершнёвского водохранилища минерального фосфора, что приводит к увеличению уровня эвтрофирования водохранилища [3].

Таким образом, наличие достаточного количества питательных веществ, хорошее прогревание водных масс на большой площади мелководий, замедленный водообмен на Шершнёвском водохранилище создают объективные условия для массового размножения цианобактерий (ЦБ) – синезелёных водорослей [6].

Продукты метаболизма цианобактерий – цианотоксины, выделяемые в водную среду как в процессе жизнедеятельности, так и после их отмирания, оказывают неблагоприятное влияние на здоровье человека [7–9]. О реальной угрозе здоровью человека от загрязнения цианобактериями питьевой воды свидетельствуют результаты, полученные в экспериментальных и эпидемиологических исследованиях отечественных и зарубежных авторов. Так, анатоксин-а имитирует действие ацетилхолина, что вызывает перевозбуждение и истощение холинэргических систем, смерть наступает из-за паралича дыхательных мышц [10, 11]. Сакситоксин блокирует натриевые каналы, что приводит к нарушению нейромышечных контактов [12–14], цитотоксин цилиндроспермопсин генотоксичен, вызывает некротические изменения в печени, сердце, почках и других внутренних органах [15, 16]. К сильнодействующим токсинам цианобактерий относится также небелковая кислота бета-N-метиламмин-Л-аланин (BMAA), вызывающая гибель нейронов. Существуют доказательства связи между данным токсином и такими патологиями, как болезни Паркинсона, Альцгеймера, амиотрофический боковой склероз [17, 18], ингибирование цианотоксином микроцистином-LR способствует развитию первичных опухолей печени [19, 20].

Цель исследования – анализ динамики видового состава фитопланктона и содержания токсичных цианотоксинов в воде Шершнёвского водохранилища и питьевой воде Челябинска.

Материалы и методы

Материалом исследования послужили результаты лабораторно-инструментальных исследований воды Шершнёвского водохранилища и питьевой воды на содержание биомассы фитопланктона, количественного и качественного (видового состава) цианобактерий. Исследования выполнены в порядке производственного контроля на водозаборе, питьевую воду отбирали на выходе со станции водоподготовки МУП ПОВВ «Сосновские водоочистные сооружения» Челябинска в 2010–2022 гг. Статистическую обработку данных проводили с использованием компьютерной программы Microsoft Excel.

Таблица 1 / Table 1

Ранжирование родов ЦБ, содержащихся в природной воде Шершнёвского водохранилища у водозабора Сосновских очистных сооружений Челябинска, за 2021 г., кл/л

Ranking of Cyanobacteria genera contained in the natural water of the Shershnevskoye reservoir at the water intake of the Sosnovskiye treatment facilities of the city of Chelyabinsk for 2021, cells/L

Ранг Rank	Род и вид цианобактерий Genus and species of cyanobacteria	Численность, кл/л Numbers, cells/L	%
1	<i>Planktothrix</i> (<i>Planktothrix agardhii</i>)	254 577 000	45,5
2	<i>Aphanizomenon</i> (<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> , <i>Aphanizomenon issatschenkoi</i>)	159 487 500	28,5
3	<i>Microcystis</i> (<i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Microcystis pulvereae</i> , <i>Microcystis wesenbergii</i> , <i>Microcystis firma</i>)	60 770 749	10,9
4	<i>Gomphosphaeria</i> (<i>Gomphosphaeria lacustri</i> f. <i>compacta</i> , <i>Gomphosphaeria pusilla</i>)	30 772 783	5,5
5	<i>Anabaena</i> (<i>Anabaena spiroides</i> , <i>Anabaena lemmermanii</i> , <i>Anabaena scheremetievi</i> , <i>Anabaena spiroides</i> , <i>Anabaena flos-aqua</i> f. <i>flos-aqua</i>)	22 269 000	3,9
6	<i>Aphanocapsa</i> (<i>Aphanocapsa parasitica</i>)	8 177 750	1,5
7	<i>Synechococcus</i> (<i>Synechococcus elongatus</i>)	6 131 166	1,1
8	<i>Phormidium</i> <i>Phormidium</i> spp., <i>Phormidium mucicola</i>	5 790 333	1
9	<i>Snowella</i> (<i>Snowella rosea</i>)	5 170 500	0,9
10	<i>Merismopedia</i> (<i>Merismopedia minima</i>)	1 443 500	0,3
10	<i>Woronichinia</i> (<i>Woronichinia naegeliana</i>)	1 408 750	0,3
11	<i>Oscillatoria</i> (<i>Oscillatoria</i> spp., <i>Oscillatoria planktonica</i>)	1 211 250	0,2
11	<i>Gloeocapsa</i> (<i>Gloeocapsa limnetica</i> , <i>Gloeocapsa dermochroa</i> , <i>Gloeocapsa vacuolate</i>)	1 048 751	0,2
11	<i>Lyngbya</i> (<i>Lyngbya limnetica</i> , <i>Lyngbya</i> spp.)	1 037 833	0,2

Объектами собственных исследований были пробы воды из Шершнёвского водохранилища, отобранные непосредственно в месте водозабора МУП ПОВВ «Сосновские водоочистные сооружения» Челябинска, пробы питьевой воды после очистки перед подачей в распределительную сеть. Пробы отбирали по графику, с марта по ноябрь 2022 г. включительно. Исследования проводили на базе аккредитованного в установленном порядке испытательного лабораторного центра ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Челябинской области».

Для определения микроцистина-LR, сакситоксина, цилиндроспермопсина и ВМАА отбор проб объёмом 100 мл проводили в бутылки из полиэтилентерефталата. Сразу после отбора проб питьевой воды для удаления остаточного хлора пробы дополнительно обрабатывали тиосульфатом натрия в концентрации до 1 мг/мл.

Для определения сакситоксина пробы воды после отбора консервировали при помощи готового буфера для разбавления проб 1 : 10 для предотвращения потери сакситоксина в результате его адсорбции.

Пробы, предназначенные для определения анатоксина-а в исходной и питьевой воде, отбирали в объёме 100 мл в бутылки из тёмного стекла. Сразу после отбора проб питьевой воды для удаления остаточного хлора пробы дополнительно обрабатывали аскорбиновой кислотой в концентрации до 1 мг/мл. В пробы исходной воды добавляли разбавитель проб в соотношении 1 : 10.

Для дальнейшего хранения пробы замораживали при температуре минус 20 °С.

Определение анатоксина-а, микроцистина-LR, сакситоксина, цилиндроспермопсина и ВМАА в исходной и питьевой воде проводили с использованием готовых иммуноферментных тест-систем производства Eurofins Abraxis (США).

С помощью ИФА-анализатора измеряли концентрацию и величину оптической плотности при 450 нм. Обработку результатов иммуноферментного анализа проводили с помощью программ для обработки результатов методом интерполяции по калибровочной кривой, которую строили по стандартным растворам.

Результаты

Наблюдения за численностью, биомассой, видовым составом фитопланктона в природной воде водозабора и питьевой водой на выходе со станции водоочистки Челябинска проводились в лаборатории Сосновских очистных сооружений водоснабжения (ОСВ) муниципального унитарного

предприятия «Производственное объединение водоснабжения и водоотведения» (МУП ПОВВ) Челябинска с использованием метода микроскопии и камеры Горяева.

Проведённый анализ данных лабораторно-инструментальных исследований позволил установить, что максимальные среднегодовые значения количества клеток фитопланктона, определённые на водозаборе Сосновских очистных сооружений (рис. 1, см. на вклейке), составили в 2010 г. 64 354 612 кл/л, в 2016 г. — 74 149 075 кл/л, в 2020 г. — 56 994 562 кл/л и в 2021 г. — 55 964 174 кл/л. Согласно данным Росгидромета, в эти годы отмечались наиболее высокие температуры воздуха (до плюс 35 °С) в весенне-летний период.

Сезонные среднееголетние колебания количественных значений фитопланктона (рис. 2, см. на вклейке) показывают, что его рост наблюдается в весенне-летний (с апреля по июль) и осенний (с сентября по октябрь) периоды.

Видовой состав фитопланктона в природной воде Шершнёвского водохранилища (2010–2022 гг.) представлен диатомовыми, синезелёными (цианобактериями) и прочими водорослями (рис. 3, см. на вклейке), причём доминирующим видом в составе фитопланктона являются цианобактерии. В разные годы анализируемого периода содержание синезелёных водорослей в составе фитопланктона составило от 68 до 86,6%.

Ретроспективный анализ количественного состава синезелёных водорослей в воде водоисточника Челябинска позволил установить, что в их развитии выражены сезонные колебания с максимальной вегетацией в летний период (июль) (рис. 4, см. на вклейке).

В последние годы, начиная с 2016 г., наметилась тенденция к появлению второго пика цветения в августе-сентябре. Увеличился также вегетационный период развития синезелёных водорослей. Так, если его продолжительность в 2010 г. приходилась на период с мая по сентябрь, то в 2017–2022 гг. — с апреля по ноябрь. Максимальное количество обнаруженных синезелёных водорослей составляло 462 433 034 кл/л (июль 2010 г.).

Ранжирование видового состава ЦБ, содержащихся в природной воде Сосновских очистных сооружений Челябинска, за 2021 г. (табл. 1) показало, что в 94,3% случаев обнаружены следующие роды и виды: *Planktothrix* (*Planktothrix agardhii*), *Aphanizomenon* (*Aphanizomenon flos-aquae*, *Aphanizomenon issatschenkoi*), *Microcystis* (*Microcystis aeruginosa*, *Microcystis pulvereae*, *Microcystis wesenbergii*, *Microcystis firma*), *Gomphosphaeria* (*Gomphosphaeria lacustri* f. *compacta*, *Gomphosphaeria pusilla*), *Aphanizomenon* *Anabaena* (*Anabaena spiroides*, *Anabaena lemmermanii*, *Anabaena scheremetievi*, *Anabaena spiroides*, *Anabaena flos-aqua* f. *flos-aqua*).

Таблица 2 / Table 2

Содержание токсинов цианобактерий в воде водозабора и питьевой воде после водоочистки на Сосновских водоочистных сооружениях Челябинска

Content of cyanobacteria toxins in water source water at the point of water intake and drinking water after water treatment at the Sosnovskiy Water Treatment Plant in Chelyabinsk

Дата отбора проб Sampling date	Концентрация цианотоксинов, мкг/л Concentration of cyanotoxins, µg/L									
	Микроцистин-LR Microcystin-LR		Анатокин-а Anatoxin-a		Сакситоксин Saxitoxin		ВМАО VMAA		Цилиндроспермопсин Cylindrospermopsin	
	источник water source	питьевая вода drinking water	источник water source	питьевая вода drinking water	источник water source	питьевая вода drinking water	источник water source	питьевая вода drinking water	источник water source	питьевая вода drinking water
15.03.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
15.04.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
11.05.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
17.05.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
24.05.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
31.05.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
06.06.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
14.06.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
20.06.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
27.06.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	4.867	< 4	< 0.04	< 0.04
04.07.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
11.07.22	0.111	< 0.1	0.132	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
18.07.22	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	10.86	< 4	< 0.04	0.041
25.07.22	> 5*	< 0.1	0.115	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	0.0402
01.08.22	0.29	0.106	0.137	0.102	< 0.015	< 0.015	15.72	< 4	< 0.04	< 0.04
08.08.22	< 0.1	0.408	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	0.0423
5.08.22	0.685	0.25	0.167	< 0.1	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
22.08.22	0.502	0.17	0.575	0.191	< 0.015	< 0.015	25.37	< 4	< 0.04	< 0.04
29.08.22	0.3	0.234	2.496	0.178	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	0.111	< 0.04
05.09.22	< 0.1	0.281	< 0.1	0.106	< 0.015	< 0.015	6.399	< 4	< 0.04	< 0.04
12.09.22	0.393	0.408	0.18	0.103	< 0.015	< 0.015	11.62	< 4	< 0.04	0.0448
19.09.22	< 0.1	0.275	< 0.1	0.37	< 0.015	< 0.015	16.4	< 4	0.045	< 0.04
22.09.22	< 0.1	1.071*	< 0.1	< 0.1	< 0.015	< 0.015	34.85	< 4	< 0.04	< 0.04
26.09.22	0.37	0.152	0.137	0.11	0.015	< 0.015	18.9	< 4	< 0.04	< 0.04
03.10.22	> 5*	0.29	< 0.1	< 0.1	0.0401	< 0.015	4.428	< 4	< 0.04	0.0483
10.10.22	< 0.1	0.42	0.114	1.256	< 0.015	0.017	4.568	< 4	< 0.04	< 0.04
24.10.22	0.322	0.106	< 0.1	0.103	< 0.015	0.0496	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
31.10.22	< 0.1	0.219	0.155	0.13	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	0.073	0.0734
03.11.22	> 5*	0.2	0.3	0.103	< 0.015	0.0183	< 4	< 4	0.652	< 0.04
07.11.22	0.228	0.283	0.283	0.135	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	< 0.04
14.11.22	< 0.1	0.179	0.136	6.029	< 0.015	0.155	5.568	< 4	< 0.04	< 0.04
21.11.22	0.825	0.67	< 0.1	0.153	0.0225	< 0.015	18.24	< 4	< 0.04	< 0.04
28.11.22	< 0.1	> 5*	0.162	1.714	< 0.015	< 0.015	< 4	< 4	< 0.04	0.04

Примечание. * – превышение ПДК (по СанПиН 1.2.3685–21).

Note: * – exceeding MPC in accordance with SanPiN 1.2.3685–211.

Обнаруженные доминирующие рода ЦБ (ранги 1–5) относятся к токсичным, способным продуцировать опасные для жизни и здоровья человека токсины. Известно, что ЦБ родов *Planktothrix*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* и *Anabaena* продуцируют такие токсины, как анатоксин-а, сакситоксин, цилиндропермопсин, микроцистин-LR и ВМАО [7, 8].

Проведены лабораторно-инструментальные исследования (табл. 2) природной воды Шершнёвского водохранилища в месте водозабора на содержание цианотоксинов. При этом микроцистин-LR обнаружен в период с июля по ноябрь 2022 г. в 13 пробах из 33 в концентрациях от 0,111 до 5 мкг/л и более. Максимальные количества микроцистина-LR, значительно превышающие рекоменду-

емый ВОЗ уровень и ПДК (1 мкг/л) в воде* (более 5 мкг/л), были установлены 25 июля, 03 октября и 03 ноября.

В воде Шершнёвского водохранилища в месте водозабора анатоксин-а обнаружен в 14 пробах в концентрациях от 0,114 до 2,496 мкг/л в период с июля по ноябрь. Максимальная концентрация 2,496 мкг/л выявлена в пробе, отобранной 28 августа 2022 г. При этом анатоксин-а идентифицирован в большинстве случаев в тех же пробах, в которых присутствовал и микроцистин-LR.

* Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

В трёх пробах исходной воды, отобранных в период с сентября по ноябрь, обнаружен сакситоксин в концентрациях от 0,015 до 0,04 мкг/л. Максимальное значение 0,04 мкг/л установлено 3 октября 2022 г. Цианотоксин ВМАА присутствовал в 13 пробах в концентрациях от 4,428 до 34,85 мкг/л в период с июня по ноябрь, цилиндроспермопсин — в четырёх пробах в концентрациях от 0,045 до 0,652 мкг/л в период с августа по ноябрь. Микроцистин-LR обнаружен в 19 пробах из 33 в концентрациях от 1,071 до > 5 мкг/л в период с августа по ноябрь. Превышения ПДК микроцистина LR (1 мкг/л) в воде согласно СанПиН 1.2.3685–21., установлены в двух пробах: от 22 сентября и 28 ноября 2022 г.

В 15 пробах питьевой воды обнаружен анатоксин-а в концентрациях от 0,103 до 6,029 мкг/л в период с августа по ноябрь. Максимальная концентрация 6,029 мкг/л обнаружена в пробе, отобранной 14 ноября 2022 г. В четырёх пробах исходной воды, отобранных в период с октября по ноябрь, обнаружен сакситоксин в концентрациях от 0,017 до 0,155 (14.11.2022) мкг/л.

Цилиндроспермопсин выявлен в семи пробах в концентрациях от 0,04 до 0,0734 мкг/л в период с июля по ноябрь. Максимальная концентрация 0,0734 мкг/л обнаружена в пробе, отобранной 31 октября 2022 г.

В питьевой воде после очистки перед подачей в распределительную сеть содержание цианотоксина ВМАА не превышало минимального предела обнаружения за весь период исследований.

Обнаруженные в исходной и питьевой воде токсины являются продуктами жизнедеятельности доминирующих в Шершнёвском водохранилище родов ЦБ: *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Oscillatoria* и *Anabaena*.

Обсуждение

Многолетняя динамика значений биогенных веществ, полученные результаты лабораторно-инструментальных исследований природной воды и питьевой воды на содержание биомассы фитопланктона, анализ его количественного и качественного (видового) состава показали, что на Шершнёвском водохранилище сложились благоприятные условия для роста и размножения токсичных видов ЦБ. Нарастающая антропогенная нагрузка, благоприятные гидрологические условия способствуют увеличению доли представителей синезелёных водорослей в составе фитопланктона [21, 22]. Так, доля ЦБ в составе фитопланктона Шершнёвского водохранилища выросла с 11,2% в 2003 г. [23] до 68–86,6% в 2010–2022 гг. Претерпела изменение видового состава и группа ЦБ. В 2014–2015 гг. увеличилось видовое разнообразие семейства *Microcystidaceae* [23]. Основной вклад в количественные характеристики *Cyanophyta* вносит род *Aphanizomenon*. Наиболее часто встречается вид *Aphanizomenon flos-aqua* (L.) Ralfs. Этот вид в массовом количестве вызывает «цветение» воды летом [1]. Вышеуказанные роды и виды относятся к потенциально опасным для жизни и здоровья человека, так как выделяют высокотоксичные нейротоксины (анатоксин-а и сакситоксины) [24] и потенциальный канцероген микроцистин-LR [25].

Климатические изменения в регионе с более ранним освобождением поверхности водохранилища ото льда (средняя температура воды в мае выросла почти на 4 °C) и более высокими осенними температурами воздуха привели к увеличению вегетационного периода ЦБ, а для отдельных токсичных видов (*Microcystis aeruginosa*) — и к круглогодичной вегетации [26].

Сосновские очистные сооружения, на которых проведены исследования, предназначены для обеспечения питьевой водой Челябинска и близлежащих городов-спутников Коркина, Копейска, Еманжелинска и осуществляют водозабор и предварительную очистку от взвеси и плавающих загрязнений воды из Шершнёвского водохранилища посредством двух водозаборов берегового типа с совмещёнными насосными станциями первого подъёма с предварительным хлорированием. В период «цветения» с целью уменьшения концентраций веществ, влияющих на привкус и запах, на этих сооружениях проводится обработка окислителем перманганатом калия (KMnO₄). Водоочистные сооружения имеют в составе четыре блока, три из которых осуществляют водоподготовку по принципу двухступенчатой схемы очистки (отстаивание и фильтрование на скорых фильтрах) и один блок — по одноступенчатой схеме (контактные осветлители). Реагентная обработка предусматривает хлорирование и коагуляцию [27]. Среднегодовая эффективность очистки исходной воды от клеток ЦБ в 2022 г. на технологических линиях с двухступенчатой схемой очистки составила от 88 до 91%, на технологической линии с одноступенчатой схемой очистки — 83%.

Можно сделать вывод о том, что существующая схема водоподготовки на Сосновских очистных сооружениях Челябинска достаточно эффективно очищает исходную воду от клеток ЦБ. Наиболее эффективными в данном отношении являются технологические линии с двухступенчатой схемой очистки (отстаивание и фильтрование на скорых фильтрах). Однако существующая схема водоподготовки, как показали результаты настоящего исследования, недостаточно эффективна в отношении цианотоксинов: анатоксина-а, цилиндроспермопсина, сакситоксина, микроцистина-LR. Используемое в схеме предварительное окисление приводит к лизису клеток ЦБ и способствует выходу цианотоксинов в воду [28–34].

Выполненные исследования свидетельствуют о возможном риске для здоровья населения от загрязнения питьевой воды цианотоксинами. Следует отметить, что в Российской Федерации отсутствуют гигиенические нормативы содержания анатоксина-а, цилиндроспермопсина, сакситоксина, ВМАА в воде источников хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, а также в питьевой воде; не разработаны методы определения цианотоксинов в воде; не осуществляется социально-гигиенический мониторинг и санитарно-гигиенический контроль их содержания в воде водоисточников и питьевой воде.

С учётом вышеизложенного в условиях не снижающегося загрязнения водных объектов цианотоксинами утверждение и введение в действие ПДК для приоритетных цианотоксинов, разработка методов их контроля будут иметь большое значение для предотвращения неблагоприятного влияния на здоровье населения.

Заключение

Проблема массового развития цианобактерий чрезвычайно актуальна для единственного поверхностного водоисточника Челябинска — Шершнёвского водохранилища. Анализ видового состава ЦБ в исходной воде показал, что среди них доминируют токсичные виды *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Oscillatoria* и *Anabaena*, при этом производимые ими токсины микроцистин-LR, анатоксин-а, сакситоксин и цилиндроспермопсин обнаружены в питьевой воде. Результаты, полученные в настоящих исследованиях, могут быть положены в основу разработки системы мониторинга, в том числе выявления приоритетных цианотоксинов и оценки риска для здоровья населения.

Литература

(п.п. 7, 9–20, 28–34 см. References)

1. Ходоровская Н.И., Дерябина Л.В., Крайнева С.В., Утопленникова А.Ю. Оценка экологического состояния Шершнёвского водохранилища в современных условиях. *Вестник Челябинского государственного университета*. 2013; (7): 165–7. <https://elibrary.ru/pywkbh>
2. Павлов А.П. Проблема изменения качества воды в Шершнёвском водохранилище. В кн.: *Материалы Международной научно-практической конференции «Уральская горная школа — регионам»*. Екатеринбург; 2022: 255–6. <https://elibrary.ru/huytdp>

3. Кравцова А.В., Ходоровская Н.И., Ячменев В.А., Баженова В.В. Особенности многолетней динамики развития гидрохимических показателей воды Шершневского водохранилища. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021; (5): 8–28. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-5-1> <https://elibrary.ru/orsszy>
4. Ходоровская Н.И., Дерябина Л.В., Крайнева С.В., Молданова Л.Н., Чернов К.С., Ячменев В.А. Формирование качества воды Шершневского водохранилища. *Научный медицинский вестник*. 2016; 4(6): 66–77. <https://doi.org/10.17117/nm.2016.04.066> <https://elibrary.ru/xxicjt>
5. Захаров С.Г. Природные риски неблагоприятных явлений в Челябинской области. В кн.: *Материалы двенадцатой региональной музейной конференции «Гореховские чтения»*. Челябинск; 2021: 171–5. <https://elibrary.ru/elewyu>
6. Пряхин Е.А., Тряпицына Г.А., Ячменев В.А., Бурмистрова А.Л., Андреев С.С., Сафонова Е.В. и др. Оценка токсических свойств цианобактерий Шершневского водохранилища Челябинской области. *Гигиена и санитария*. 2008; 87(1): 73–5. <https://elibrary.ru/ilgnnn>
8. Волошко Л.Н., Пиневиц А.В. Разнообразие токсинов цианобактерий. *Астраханский вестник экологического образования*. 2014; (1): 68–80. <https://elibrary.ru/rxbfsp>
21. Гладкова О.В., Ходоровская Н.И. Видовая структура и эколого-географическая характеристика фитопланктонного сообщества Шершневского водохранилища в условиях возрастающего антропогенного воздействия. *Научное обозрение*. 2019; (3): 11–6. <https://elibrary.ru/cjggop>
22. Липайкина А.Н. Экологическое состояние р. Миасс и Шершневского водохранилища как источников водоснабжения г. Челябинска. В кн.: *Химия и жизнь: сборник тезисов и докладов международной научно-практической конференции*. Новосибирск; 2011: 223–6.
23. Гладкова О.В., Ходоровская Н.И., Еремкина Т.В. Многолетняя динамика структуры фитопланктона Шершневского водохранилища. В кн.: *Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: сборник материалов VI Всероссийской конференции по водной экотоксикологии, посвященной 80-летию со дня рождения д.б.н., проф. Б.А. Флерова, с приглашением специалистов из стран ближнего зарубежья*. Ярославль: Филигрань; 2017: 17–21.
24. Чернова Е.Н., Русских Я.В., Жаковская З.А. Токсичные метаболиты сине-зелёных водорослей и методы их определения. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия*. 2017; 4(4): 440–73. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2017.408> <https://elibrary.ru/ynoiki>
25. Егорова Н.А., Кузь Н.В., Силицына О.О. Материалы к обоснованию гигиенического норматива микроцистина-LR в воде водных объектов. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(11): 1046–52. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-11> <https://elibrary.ru/slxzjn>
26. Гаязова А.О., Абдуллаев С.М. Влияние климатической изменчивости на фитопланктонные комплексы Шершневского питьевого водохранилища (Южный Урал). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2019; (2): 53–64. <https://elibrary.ru/esbusc>
27. Перемыкина Л.А., Смирнов А.Д., Герасимов М.М., Давлятурова Р.А., Смагин В.А. Современные технологии водоподготовки в г. Челябинске. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2012; (8): 7–12. <https://elibrary.ru/pbmjpr>

References

1. Khodorovskaya N.I., Deryabina L.V., Kraineva S.V., Utoplennikova A.Yu. Ecological condition assessment of the Shershnevskoe reservoir under present conditions. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013; (7): 165–7. <https://elibrary.ru/pywbkh> (in Russian)
2. Pavlov A.P. The problem of water quality change in the Shershnevsky reservoir. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Ural Mining School – Regions» [Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ural'skaya gornaya shkola – regionam»]*. Yekaterinburg; 2022: 255–6. <https://elibrary.ru/huytdp> (in Russian)
3. Kravtsova A.V., Khodorovskaya N.I., Yachmenev V.A., Bazhenova V.V. Features of the long-term dynamics of development hydro/chemical parameters of the water of the Shershnevsk reservoir. *Vodnoe khozaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2021; (5): 8–28. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-5-1> <https://elibrary.ru/orsszy> (in Russian)
4. Khodorovskaya N.I., Deryabina L.V., Krayneva S.V., Moldanova L.N., Chernov K.S., Yachmenev V.A. Formation of waters quality of the Shershnevsky reservoir. *Nauchnyi meditsinskii vestnik*. 2016; 4(6): 66–77. <https://doi.org/10.17117/nm.2016.04.066> <https://elibrary.ru/xxicjt> (in Russian)
5. Zakharov S.G. Natural risks of adverse events in the Chelyabinsk region. In: *Proceedings of the Twelfth Regional Museum Conference «Gorokhov Readings» [Materialy dvenadtsatoi regional'noi muzeinoi konferentsii «Gorokhovskie chitaniya»]*. Chelyabinsk; 2021: 171–5. <https://elibrary.ru/elewyu> (in Russian)
6. Pryakhin E.A., Tryapitsyna G.A., Yachmenev V.A., Burmistrova A.L., Andreyev S.S., Safonova E.V., et al. Assessment of the toxic properties of cyanobacteria in the Shershnevskoye reservoir, Chelyabinsk region. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2008; 87(1): 73–5. <https://elibrary.ru/ilgnnn> (in Russian)
7. Chorus I., Bartram J., eds. *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. London: CRC Press; 1999. <https://doi.org/10.1201/9781482295061>
8. Voloshko L.N., Pinevich A.V. Diversity of the cyanobacterial toxins. *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2014; (1): 68–80. <https://elibrary.ru/rxbfsp> (in Russian)
9. Buratti F.M., Manganelli M., Vichi S., Stefanelli M., Scardala S., Testai E., et al. Cyanotoxins: producing organisms, occurrence, toxicity, mechanism of action and human health toxicological risk evaluation. *Arch. Toxicol.* 2017; 91(3): 1049–130. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1913-6>
10. Devic E., Li D., Dauta A., Henriksen P., Codd G.A., Marty J.L., et al. Detection of anatoxin-a(s) in environmental samples of cyanobacteria by using a biosensor with engineered acetylcholinesterases. *Appl. Environ. Microbiol.* 2002; 68(8): 4102–6. <https://doi.org/10.1128/aem.68.8.4102-4106.2002>
11. Plata-Calzado C., Prieto A.I., Cameán A.M., Jos A. Toxic effects produced by anatoxin under laboratory conditions: a review. *Toxins (Basel)*. 2022; 14(12): 861. <https://doi.org/10.3390/toxins14120861>
12. Carmichael W.W., Evans W.R., Yin Q.Q., Bell P., Moczydlowski E. Evidence for paralytic shellfish poisons in the freshwater cyanobacterium *Lyngbya wollei* (Farlow ex Gomont) comb. nov. *Appl. Environ. Microbiol.* 1997; 63(8): 3104–10. <https://doi.org/10.1128/aem.63.8.3104-3110.1997>
13. Pearson L., Mihali T., Moffitt M., Kellmann R., Neilan B. On the chemistry, toxicology and genetics of the cyanobacterial toxins, microcystin, nodularin, saxitoxin and cylindrospermopsin. *Mar. Drugs*. 2010; 8(5): 1650–80. <https://doi.org/10.3390/md8051650>
14. Araújo R., Molgó J., Tandeau de Marsac N. Neurotoxic cyanobacterial toxins. *Toxicon*. 2010; 56(5): 813–28. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2009.07.036>
15. Moreira C., Azevedo J., Antunes A., Vasconcelos V. Cylindrospermopsin: occurrence, methods of detection and toxicology. *J. Appl. Microbiol.* 2013; 114(3): 605–20. <https://doi.org/10.1111/jam.12048>
16. Yang Y., Yu G., Chen Y., Jia N., Li R. Four decades of progress in cylindrospermopsin research: The ins and outs of a potent cyanotoxin. *J. Hazard. Mater.* 2021; 406: 124653. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124653>
17. Jonasson S., Eriksson J., Berntzon L., Spacil Z., Ilag L.L., Ronnevi L.O., et al. Transfer of a cyanobacterial neurotoxin within a temperate aquatic ecosystem suggests pathways for human exposure. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2010; 107(20): 9252–7. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914417107>
18. Porojan C., Mitrovic S.M., Yeo D.C., Furey A. Overview of the potent cyanobacterial neurotoxin β-methylamino-L-alanine (BMAA) and its analytical determination. *Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess.* 2016; 33(10): 1570–86. <https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1217070>
19. Zegura B. An overview of the mechanisms of microcystin-Lr genotoxicity and potential carcinogenicity. *Mini Rev. Med. Chem.* 2016; 16(13): 1042–62. <https://doi.org/10.2174/1389557516666160308141549>
20. Chen L., Xie P. Mechanisms of microcystin-induced cytotoxicity and apoptosis. *Mini Rev. Med. Chem.* 2016; 16(13): 1018–31. <https://doi.org/10.2174/1389557516666160219130407>
21. Gladkova O.V., Khodorovskaya N.I. Structure of species and ecological-geographical characteristics of the phytoplankton community of Shershnevsky reservoir in the conditions of increasing anthropogenic impact. *Nauchnoe obozrenie*. 2019; (3): 11–6. <https://elibrary.ru/cjggop> (in Russian)
22. Lipaikina A.N. The ecological state of the Miass river and the Shershnevsky reservoir as sources of water supply in Chelyabinsk. In: *Chemistry and Life: A Collection of Abstracts and Reports of the International Scientific and Practical Conference [Kimiya i zhizn': sbornik tezisev i dokladov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii]*. Novosibirsk; 2011: 223–6. (in Russian)
23. Gladkova O.V., Khodorovskaya N.I., Eremkina T.V. Long-term dynamics of the phytoplankton structure of the Shershnevsky reservoir. In: *Anthropogenic Impact on Aquatic Organisms and Ecosystems: A Collection of Materials of the VI All-Russian Conference on Aquatic Ecotoxicology, Dedicated to the 80th Anniversary of the Birth of Doctor of Biological Sciences, Professor B. A. Flerov, with the Invitation of Specialists from Neighboring Countries*. Yaroslavl: Filigran'; 2017: 17–21. (in Russian)
24. Chernova E.N., Russkikh Ya.V., Zhakovskaya Z.A. Toxic metabolites of blue-green algae and methods for their determination. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Fizika i khimiya*. 2017; 4(4): 440–73. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2017.408> <https://elibrary.ru/ynoiki> (in Russian)
25. Egorova N.A., Kuz N.V., Sinitsyna O.O. Materials for the substantiation of the hygienic standard for microcystin-LR in the water of water bodies. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(11): 1046–52. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-11> <https://elibrary.ru/slxzjn> (in Russian)
26. Gayazova A.O., Abdullaev S.M. The influence of climatic variability on phytoplankton complexes of the Shershnevsky drinking reservoir (Southern Ural). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*. 2019; (2): 53–64. <https://elibrary.ru/esbusc> (in Russian)
27. Peremykina L.A., Smimov A.D., Gerasimov M.M., Davlyaturova R.A., Smagin V.A. Modern water treatment technologies in Chelyabinsk. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2012; (8): 7–12. <https://elibrary.ru/pbmjpr> (in Russian)
28. Ghernaout D., Elboughdiri N. Eliminating cyanobacteria and controlling algal organic matter – short notes. *Open Access Library J.* 2020; 7(4): 1–17. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106252>
29. Daly R.I., Ho L., Brookes J.D. Effect of chlorination on *Microcystis aeruginosa* cell integrity and subsequent microcystin release and degradation. *Environ. Sci. Technol.* 2007; 41(12): 4447–53. <https://doi.org/10.1021/es070318s>
30. Zamyadi A., Ho L., Newcombe G., Bustamante H., Prévost M. Fate of toxic cyanobacterial cells and disinfection by-products formation after chlorination. *Water Res.* 2012; 46(5): 1524–35. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.029>

31. Fan J., Ho L., Hobson P., Brookes J. Evaluating the effectiveness of copper sulphate, chlorine, potassium permanganate, hydrogen peroxide and ozone on cyanobacterial cell integrity. *Water Res.* 2013; 47(14): 5153–64. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.057>
32. Fan J., Hobson P., Ho L., Daly R., Brookes J. The effects of various control and water treatment processes on the membrane integrity and toxin fate of cyanobacteria. *J. Hazard. Mater.* 2014; 264(6): 313–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.10.059>
33. Li X., Chen S., Zeng J., Song W., Yu X. Comparing the effects of chlorination on membrane integrity and toxin fate of high- and low-viability cyanobacteria. *Water Res.* 2020; 177(8): 115769. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115769>
34. Li X., Chen S., Zeng J., Chabi K., Song W., Xian X., et al. Impact of chlorination on cell activation, toxin release and degradation of cyanobacteria of development and maintenance stage. *Chem. Eng. J.* 2020; 397: 125378. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125378>

Сведения об авторах

Турбинский Виктор Владиславович, доктор мед. наук, зав. отд. гигиены воды, гл. науч. сотр. ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: turbinskii.vv@fncg.ru

Брагина Ирина Викторовна, доктор мед. наук, профессор, зам. руководителя Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 127994, Москва, Россия. E-mail: info@rospotrebnadzor.ru

Кузь Надежда Валентиновна, канд. мед. наук, вед. науч. сотр. отд. гигиены воды ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: nadezhda.v.k@gmail.com

Синицына Оксана Олеговна, доктор мед. наук, профессор, член-корр. РАН, зам. директора по науке ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, директор Института комплексных проблем гигиены ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: oxsin66@mail.ru

Пушкарёва Мария Васильевна, доктор мед. наук, профессор, гл. науч. сотр. отд. гигиены воды ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: pushkareva.mv@fncg.ru

Information about the authors

Victor V. Turbinskiy, DSc (Medicine), Head of the Department of Water Hygiene, Chief researcher of the Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7668-9324> E-mail: turbinskii.vv@fncg.ru

Irina V. Bragina, DSc (Medicine), Deputy Head of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, Moscow, 127994, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-7531-1372> E-mail: info@rospotrebnadzor.ru

Nadezhda V. Kuz, PhD (Medicine), Leading researcher of the Water Hygiene Department of the Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7573-0185> E-mail: nadezhda.v.k@gmail.com

Oxana O. Sinitsyna, DSc (Medicine), Professor, Corresponding Member of RAS, Deputy Director for Science, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0241-0690> E-mail: oxsin66@mail.ru

Maria V. Pushkareva, DSc (Medicine), Professor, Chief researcher of the Water Hygiene Department of the Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5932-6350> E-mail: pushkareva.mv@fncg.ru

К статье В.В. Турбинского и соавт.
To the article by Viktor V. Turbinsky et al.

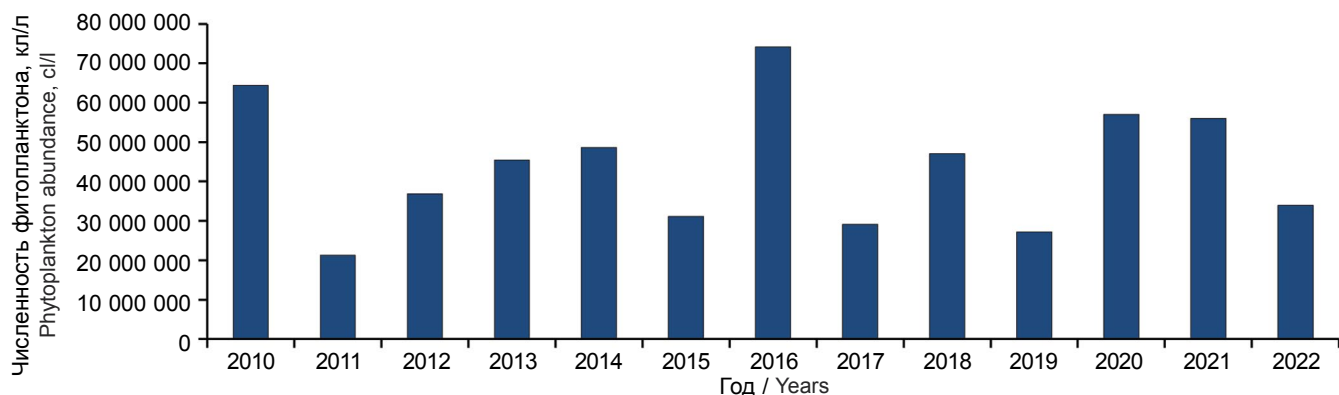


Рис. 1. Динамика среднегодового содержания фитопланктона на водозаборе Сосновских очистных сооружений Челябинска в 2019–2022 гг., кл/л.

Fig. 1. Trend in the average annual content of phytoplankton in the water of the Shershchnevsky reservoir at the site of the Sosnovsky water treatment plant in Chelyabinsk in 2019–2022, c/l/l.

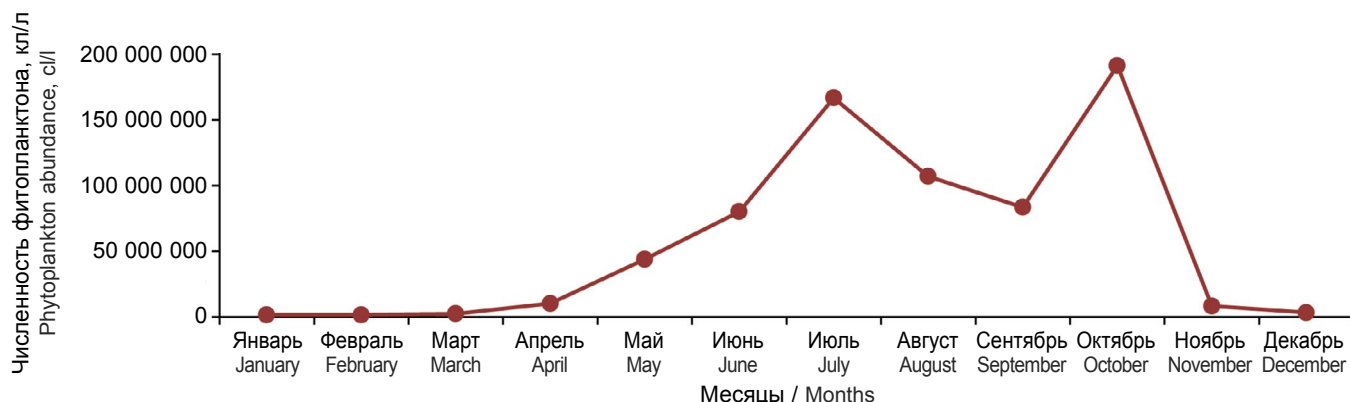


Рис. 2. Сезонная динамика средних многолетних количественных значений фитопланктона на водозаборе Сосновских очистных сооружений Челябинска в 2010–2022 гг.

Fig. 2. Seasonal trend in average long-term quantitative values of phytoplankton in the water of the Shershchnevsky reservoir at the Sosnovsky water treatment plant in Chelyabinsk over 2010–2022.

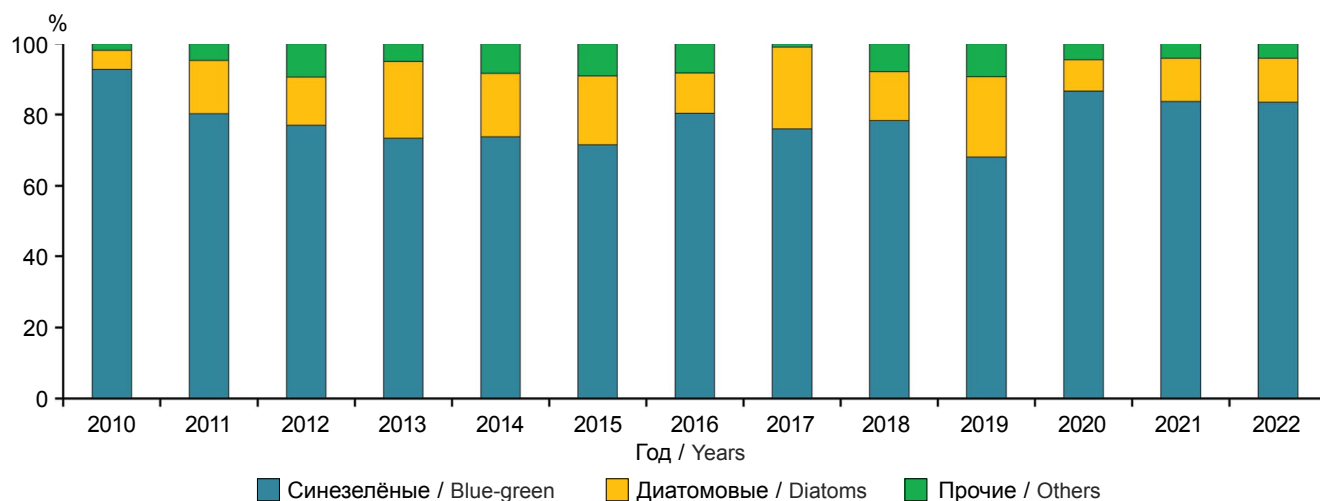


Рис. 3. Среднегодовое соотношение численности основных видов водорослей в природной воде Шершнёвского водохранилища у водозабора Сосновских очистных сооружений Челябинска в 2010–2022 гг., %.

Fig. 3. Average annual ratio of the abundance of the main species of algae in the natural water of the Shershnevsky reservoir at the water intake of the Sosnovsky treatment facilities in Chelyabinsk over 2010–2022, %.

К статье В.В. Турбинского и соавт.
To the article by Viktor V. Turbinsky et al.

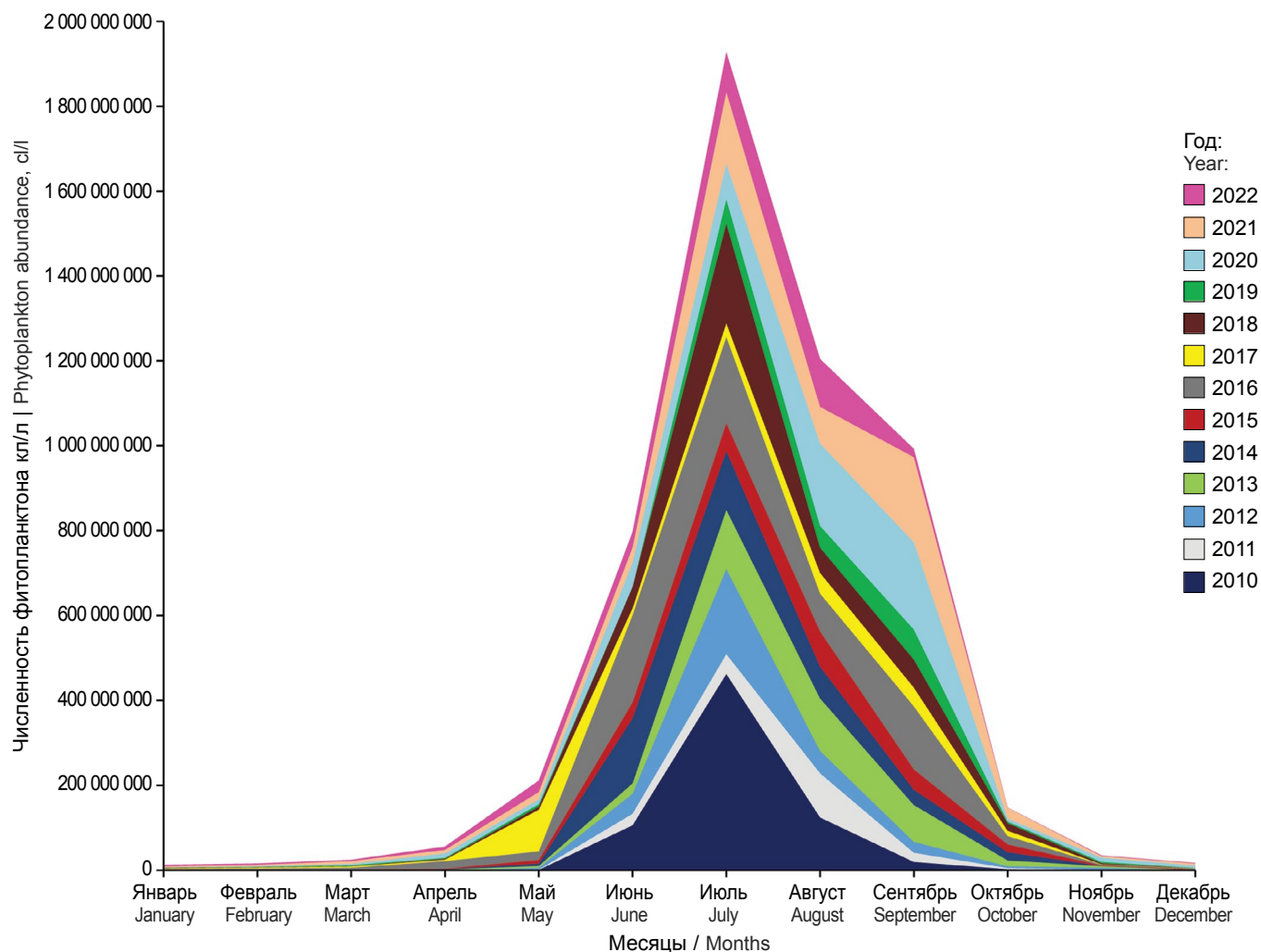


Рис. 4. Среднемесячная сезонная динамика синезелёных водорослей (цианобактерий) в воде Шершнёвского водохранилища у водозабора Сосновских очистных сооружений Челябинска в 2010–2022 гг., кл/л.

Fig. 4. Average monthly seasonal trend in blue-green algae (cyanobacteria) in water of the Shershnevskoye reservoir at the water intake of the Sosnovsky treatment facilities in Chelyabinsk for 2010–2022, cells/L.