

Читайте
онлайн
Read
onlineСиницына О.О.¹, Кузь Н.В.^{1,2}, Пушкарёва М.В.¹, Турбинский В.В.¹, Ширяева М.А.¹

Цианобактерии и цианотоксины в воде водоисточников – угроза безопасности населения

¹ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия;²ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Москве», Россия, 129626, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Массовое цветение водорослей характерно для всех климатических поясов России и наблюдается во всех федеральных округах. Наибольшую опасность представляет бурное размножение цианобактерий (ЦБ), в процессе жизнедеятельности и гибели которых в воду поступают высокотоксичные цианотоксины.

Цель работы — гигиеническая оценка загрязнения ЦБ и цианотоксинами поверхностных источников питьевого и хозяйственно-бытового водопользования Москвы, Челябинска, Ростова-на-Дону и разработка профилактических мероприятий, направленных на снижение риска для здоровья населения.

Материалы и методы. Объекты исследования — ЦБ и цианотоксины (микроцистин-LR, анатоксин-а, цилиндроспермопсин, β-N-метиламино-1-аланин (БМАА), сакситоксин), которые исследовали в поверхностных источниках водоснабжения Москвы, Челябинска и Ростова-на-Дону. Использованы теоретические и эмпирические методы научного системного анализа. Проведены поиск и обобщение данных отечественной и иностранной научной литературы из баз данных научных публикаций MedLine/PubMed/PubChem, Scopus, eLIBRARY, результатов производственного контроля водоснабжающих организаций, собственных химико-аналитических и токсикологических исследований.

Результаты. Выявлены региональные особенности количественного состава и внутривидовой дифференциации токсичных видов ЦБ в поверхностных водоисточниках, находящихся в разных климатических поясах. Выполнена гигиеническая оценка загрязнения водоисточников цианотоксинами и эффективности очистки питьевой воды. В дополнение к действующей ПДК микроцистина-LR (СанПиН 1.2.3685–21) обоснованы ПДК анатоксина-а, цилиндроспермопсина, БМАА, продуцируемых приоритетными видами ЦБ в водоисточниках России. Разработан алгоритм текущего мониторинга загрязнения воды ЦБ и цианотоксинами и предложены профилактические мероприятия, направленные на снижение риска для здоровья населения вследствие загрязнения питьевой воды цианотоксинами.

Ограничения исследования. Отсутствие отечественных стандартов и тест-систем, позволяющих выявлять приоритетные цианотоксины в воде с необходимой достоверностью результатов.

Заключение. Большинство поверхностных водоисточников Российской Федерации подвержено антропогенному, а в последние годы и климатическому влиянию, что создаёт благоприятные условия для массового развития ЦБ. Последнее отрицательно сказывается на качестве и безопасности питьевой воды и требует разработки и внедрения методических рекомендаций по предупреждению и контролю загрязнения токсичными видами ЦБ и цианотоксинами воды водоисточников хозяйственно-питьевого, культурно-бытового водопользования и питьевой воды.

Ключевые слова: цианобактерии; синезелёные водоросли; цианотоксины; поверхностные водоисточники; питьевая вода; водопользование

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

Для цитирования: Синицына О.О., Кузь Н.В., Пушкарёва М.В., Турбинский В.В., Ширяева М.А. Цианобактерии и цианотоксины в воде водоисточников — угроза безопасности населения. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(1): 15–24. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-1-15-24> <https://elibrary.ru/csfsc>

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

Вклад авторов: Синицына О.О. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Кузь Н.В. — разработка дизайна исследований, сбор и обработка материала, написание текста, редактирование; Пушкарёва М.В., Турбинский В.В., Ширяева М.А. — обработка материала. Все соавторы — ответственность за целостность всех частей статьи и утверждение её окончательного варианта.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие 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: 20.11.2025 / Принята к печати: 02.12.2025 / Опубликовано: 10.02.2026

Oxana O. Sinitsyna¹, Nadezhda V. Kuz^{1,2}, Maria V. Pushkareva¹, Viktor V. Turbinsky¹, Margarita A. Shiryayeva¹

Cyanobacteria and cyanotoxins in water sources – a threat to public water safety

¹Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 14.1014, Russian Federation;²Center for Hygiene and Epidemiology in Moscow, Moscow, 129626, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Massive algal blooms typical of all climatic zones of the Russian Federation are observed in all federal districts. The greatest danger is posed by the rapid proliferation of cyanobacteria (CB), whose life cycle and death release highly hazardous cyanotoxins into the water.

The purpose — hygienic assessment of contamination of Moscow, Chelyabinsk, and Rostov-on-Don surface sources of drinking and domestic water with CB and cyanotoxins and the development of preventive measures aimed at reducing the risk to public health.

Materials and methods. The objects of the study were CB and cyanotoxins (microcystin-LR, anatoxin-a, cylindrospermopsin, β-N-methylamino-1-alanine (BMAA), saxitoxin), investigated in surface water sources in the cities of Moscow, Chelyabinsk, and Rostov-on-Don. Theoretical and empirical methods of scientific systems analysis were used. Data from domestic and foreign scientific literature were searched and summarized from the MedLine/PubMed/PubChem, Scopus, and eLIBRARY scientific publication databases, the results of industrial control of water supply institutions, and own chemical analytical and toxicological studies.

Results. Regional patterns in the quantitative composition and intraspecific differentiation of toxic cyanobacteria species in surface water sources located in different climatic zones were identified. A hygienic assessment of cyanotic contamination of water sources and the effectiveness of drinking water treatment were conducted. In addition to the current MAC for microcystin-LR (SanPiN 1.2.3685–21), MACs for anatoxin-a, cylindrospermopsin, and BMAA produced by priority types of CB in water sources in the Russian Federation have been substantiated. An algorithm for current monitoring of water pollution with CB and cyanotoxins has been developed, and preventive measures aimed at reducing the risk to public health from drinking water pollution with cyanotoxins have been proposed.

Limitations. The lack of domestic standards and test systems that allow testing the content of priority cyanotoxins in water with the required reliability of results.

Conclusion. Most surface water sources in the Russian Federation are subject to anthropogenic and, in recent years, climatic influences, creating favorable conditions for the widespread development of CB. The latter, in turn, adversely impacts the quality and safety of drinking water and requires the development and implementation of methodological recommendations for the prevention and control of pollution of water sources for domestic, cultural and household water use, and drinking water with toxic types of CB and cyanotoxins.

Keywords: cyanobacteria; blue-green algae; cyanotoxins; surface water sources; drinking water; water use

Compliance with ethical standards. The study does not require the submission of a biomedical ethics committee opinion or other documents.

For citation: Sinitsyna O.O., Kuz N.V., Pushkareva M.V., Turbinsky V.V., Shiryayeva M.A. Cyanobacteria and cyanotoxins in water sources – a threat to the safety of water use of the population. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(1): 15–24. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-1-15-24> <https://elibrary.ru/csfsec> (In Russ.)

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

Contributions: Sinitsyna O.O. – research concept and design, text writing, editing; Kuz N.V. – research design development, collection and processing of material, text writing; Pushkareva M.V., Turbinsky V.V., Shiryayeva M.A. – handling material. 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.

Funding. 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: November 11, 2025 / Accepted: December 2, 2025 / Published: February 10, 2026

Введение

Повышение качества питьевого водоснабжения населения – одна из национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 г. [1]. Важным условием обеспечения качества и безопасности питьевой воды является санитарная надёжность водоисточника, однако большинство поверхностных водоисточников нашей страны подвержено интенсивному антропогенному загрязнению [2]: количество поверхностных источников централизованного питьевого водоснабжения, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям, за период 2014–2023 гг. выросло на 4,76% [3]. При этом 33,4% вышеуказанных водоисточников не соответствуют санитарно-эпидемиологическим требованиям из-за отсутствия организованных зон санитарной охраны, предназначенных для защиты и предупреждения загрязнения мест водозаборов [3].

Хроническая антропогенная нагрузка способствует поступлению в водоём с неочищенными и недостаточно очищенными сточными водами и выделению накопленных в донных отложениях питательных биогенных веществ: минеральных соединений азота, фосфора, кремния, железа и некоторых микроэлементов, служащих источником питания для цианобактерий (ЦБ), или синезелёных водорослей [4]. Поскольку фосфор играет важную роль в стимуляции роста ЦБ, некоторые страны, среди которых государства ЕС, Япония, Новая Зеландия, Южная Корея, Бразилия, установили допустимые значения его содержания в сточных водах [5]. Внедряются новые технологии очистки сточных вод с удалением биогенных элементов (азота и фосфора) и в нашей стране [6].

Впервые с проблемой цветения водоёмов наша страна столкнулась в 60-е годы XX века после реализации программы водохозяйственного гидротехнического строительства каскада водохранилищ на крупных водных артериях, в том числе Днепре и Волге, при этом интенсивность роста и развития ЦБ возрастала от северных водохранилищ к южным. Образование водохранилищ без надлежащей очистки ложа, имеющего значительные земельные площади, находившиеся под антропогенным воздействием, а также резкое изменение гидрологических характеристик речного стока, снижение скорости движения воды, образование обширных мелководных и застойных зон, тепловое загрязнение способствовали усилению процессов эвтрофикации водоёмов [7]. Нарастающая антропогенная нагрузка,

благоприятные гидрологические условия способствовали увеличению доли представителей синезелёных водорослей в составе фитопланктона.

Значительное влияние на интенсивность и продолжительность процессов цветения поверхностных водоёмов оказывает климатический фактор. Согласно многолетним наблюдениям Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, темпы роста температуры воздуха на территории России с середины 1970-х годов составляли 0,5 °C в 10 лет, то есть в 2,8 раза интенсивнее по сравнению со средней глобальной температурой (0,18 °C за 10 лет), при этом наблюдается тенденция к увеличению темпов роста [8]. В отличие от других видов фитопланктона оптимальной для развития отдельных родов ЦБ считается температура выше плюс 25 °C [9]. Так, *Cylindrospermopsis* активно развиваются в температурном диапазоне от плюс 20 до плюс 35 °C, при этом максимальный рост происходит при температуре плюс 30 °C [10]. Рост температур поверхностных вод способствует распространению ЦБ в северном направлении, и эти бактерии активно занимают не своиственные им ранее места обитания [11].

Процессы цветения синезелёных водорослей наблюдаются во всех климатических поясах Российской Федерации, в том числе регионах с более холодным климатом: Северо-Западном, Уральском, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах, однако наиболее часто массовое развитие ЦБ по-прежнему наблюдается в Южном федеральном округе [12].

Массовое развитие ЦБ оказывает существенное влияние на санитарно-гигиенические показатели качества и безопасности воды. Продукты метаболизма, выделяемые в водную среду как в процессе жизнедеятельности ЦБ, так и после их отмирания, могут ухудшать органолептические и санитарно-гигиенические показатели воды. Рост и развитие ЦБ являются основной причиной появления у воды различных неприятных и трудноудаляемых привкусов и запахов [13]. Кроме того, в период цветения увеличивается цветность воды [14]. Распад клеток фитопланктона способствует повышению уровня мутности воды [15]. При высокой концентрации ЦБ в воде изменяется её окраска. В частности, при массовом развитии видов *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena* вода приобретает изумрудно-зелёный цвет, который переходит в синий при разложении водорослей, что связано с выходом из клетки зелёного пигмента хлорофилла-а и синего пигмента фикоцианина [16]. Однако

ЦБ могут придавать воде и другие цвета в зависимости от различных комбинаций пигментов, их известно ≈ 30 [17]. Содержание растворённого кислорода в воде при скоплении ЦБ и деструкции органического вещества падает. Дефицит кислорода в воде водоёмов часто является причиной заморов рыбы [18]. В период гибели клеток ЦБ и разложения органического вещества наблюдается значительное увеличение биохимического потребления кислорода (БПК), содержания аммонийного азота в воде [19]. В период интенсивного развития ЦБ pH воды обычно повышается до щелочных уровней [20]. Слабощелочная среда в сочетании с низким содержанием кислорода оптимизирует условия для некоторых возбудителей опасных инфекционных болезней, в том числе холерного вибриона [21]. Цианобактериальные водорослевые скопления в период разложения производят большое количество летучих соединений серы, в том числе сероводород, метилмеркаптан и диметилсульфид [22]. Последние исследования показали, что разложение водорослей стимулировало выработку сероводорода сульфатредуцирующими бактериями [23]. Накопление в воде бутилового спирта, масляной, молочной, уксусной и других кислот, образующихся в результате процессов брожения в массовых скоплениях водорослей, также отрицательно сказывается на качестве воды [24].

Однако наиболее острая проблема массового развития ЦБ в воде — их способность продуцировать токсины, неблагоприятно влияющие на здоровье человека [25]. В настоящее время известно около 40 токсигенных видов ЦБ [26]. Согласно [27], в 70% случаев цветение пресноводных водоёмов является токсичным. В целом число идентифицированных цианотоксинов, продуцируемых синезелёными водорослями, достигает, по данным литературы [28], 95 веществ. Наибольшую обеспокоенность в мире вызывают в связи с возможностью загрязнения питьевой воды микроцистин-LR, анатоксин-а, цилиндропермопсин, β -N-метиলামин-1-аланин (БМАА) и сакситоксин из-за их высокой токсичности и опасности, в том числе канцерогенной [29]. Спектр биологического действия этих веществ достаточно широк, но основными являются нейро-, гепато- и цитотоксические эффекты [28–30].

Таким образом, данные экспериментальных и эпидемиологических исследований отечественных и зарубежных авторов свидетельствуют о токсичности и опасности большинства токсинов ЦБ для человека и животных, что подтверждает актуальность контроля и нормирования ЦБ и продуктов их жизнедеятельности в воде водоисточников и питьевой воде. Вышеизложенное определило цель настоящего исследования.

Цель работы — гигиеническая оценка загрязнения ЦБ и цианотоксинами поверхностных источников хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования Москвы, Челябинска, Ростова-на-Дону и разработка профилактических мероприятий, направленных на снижение риска для здоровья населения.

Материалы и методы

Объектами исследования служили ЦБ (синезелёные водоросли) и продуцируемые ими цианотоксины, которые присутствуют в поверхностных источниках водоснабжения населения, расположенных в основных (I, II и III) климатических поясах Российской Федерации (Москва, Московская, Челябинская, Ростовская области).

Использованы теоретические и эмпирические методы научного системного анализа. Проведены поиск и обобщение данных отечественной и иностранной научной литературы, представленной в базах данных научных публикаций MedLine/PubMed/PubChem, Scopus, eLIBRARY, ретроспективных результатов производственного контроля водоисточников, выполненного водоснабжающими организациями коммунального хозяйства Москвы (2009–2023), Челябинска (2010–2022) и Ростова-на-Дону (2019–2023), собственных химико-аналитических и токсикологических

исследований, которые послужили основой для разработки подходов к минимизации рисков для здоровья населения, связанных с загрязнениями питьевой воды токсичными видами ЦБ и цианотоксинов.

В химико-аналитических исследованиях с применением методов иммуноферментного анализа изучали содержание цианотоксинов микроцистина-LR, анатоксина-а, цилиндропермопсина, β -N-метиলামин-1-аланина (БМАА) и сакситоксина в воде водоисточников и питьевой воде Москвы — Москворецкий водоисточник (р. Москва, 2016 и 2023 гг.), Челябинска (Шершнёвское водохранилище, 2022 г.) и Ростова-на-Дону (р. Дон, 2022 г.). Оценивали эффективность технологий, используемых для очистки воды от цианотоксинов на Рублёвской (2016 г.) и Западной (2023 г.) станциях водоподготовки Москвы.

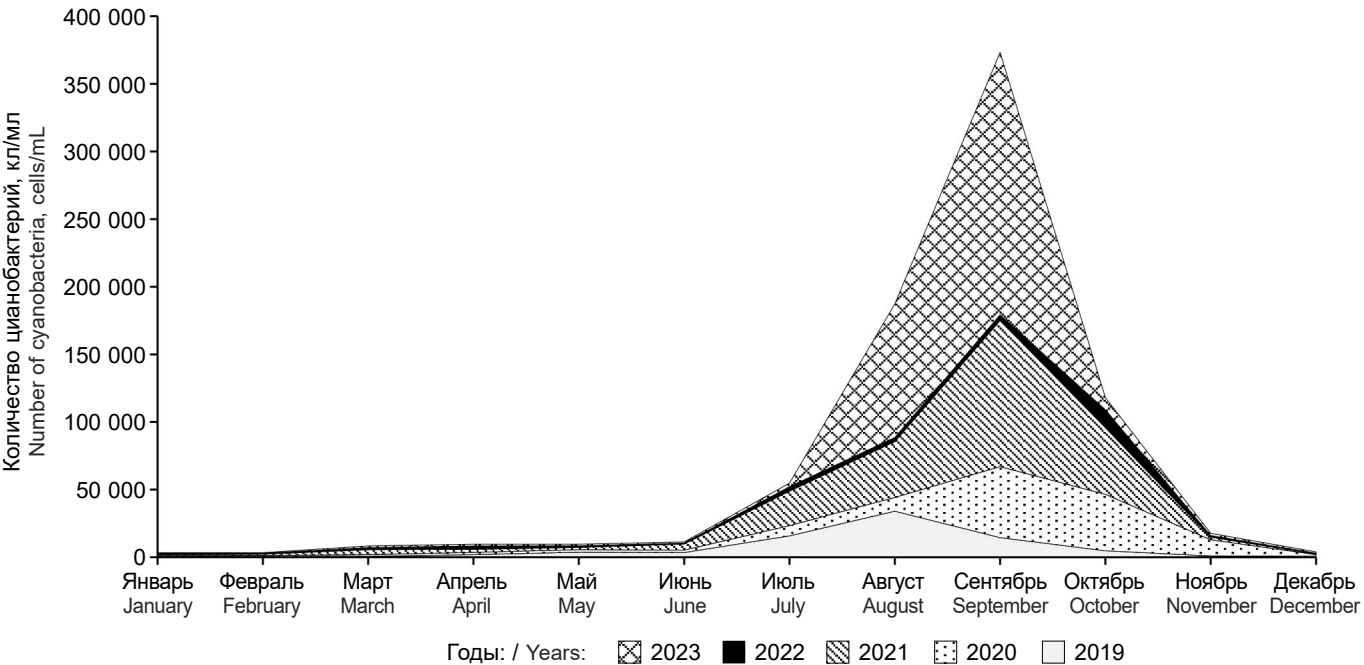
Токсикологические исследования включали изучение общетоксического, нейротоксического, эмбриотоксического и тератогенного действия анатоксина-а, цилиндропермопсина и БМАА (бета-метиলামин-L-аланин) в субхроническом эксперименте при внутрижелудочном поступлении в организм лабораторных животных.

Результаты

Наиболее распространёнными и хорошо изученными продуктами метаболизма ЦБ, придающими воде неприятный привкус и запах, являются геосмин и 2-метилизобарнеол [31]. Собственные результаты ретроспективного анализа исследований воды поверхностных водоисточников Москвы показали положительную взаимосвязь количества ЦБ с содержанием геосмина в исходной воде ($r = 0,31$; $p < 0,01$) [32]. Затхлые неприятные запахи, придаваемые воде одорантами, на фоне запаха хлора часто ассоциируется с запахом дуста. В распределительной сети запах может усиливаться, вызывая обоснованные жалобы населения [33]. Традиционные методы очистки воды (коагулирование с последующим осветлением, обеззараживание с помощью химических реагентов) недостаточно эффективны в отношении вышеуказанных одорантов. Более эффективное решение задачи удаления неприятных запахов и привкусов, вызываемых ЦБ, по-видимому, заключается в сочетании традиционных методов (физико-химических и биологических) с передовыми процессами окисления, такими как окислительно-сорбционная обработка с использованием озона и гранулированного активированного угля. Использование озонсорбции положительно зарекомендовало себя в технологии водоочистки Западной станции водоподготовки Москвы, где в 2011 г., согласно Постановлению Правительства Москвы от 14 марта 2006 г. № 176-ПП «О развитии систем водоснабжения и канализации города Москвы на период до 2020 года», был запущен в эксплуатацию новый озонсорбционный блок с проектной производительностью 250 тыс. м³/сут [34].

В результате ретроспективного анализа многолетних данных гидробиологических исследований воды источников питьевого водоснабжения Москвы, Челябинска и Ростова-на-Дону за периоды наблюдений отмечено существенное увеличение общей численности ЦБ в пиковые месяцы цветения; так, в реке Москве — с 21 500 кл/мл в 2009 г. до 73 080 кл/мл в 2019 г., в реке Дон — с 34 035 кл/мл в 2019 г. до 194 037 кл/мл в 2023 г. Максимальные концентрации цианобактерий в Шершнёвском водохранилище наблюдались в 2010 г. — 462 000 кл/мл.

Также следует отметить удлинение вегетационного периода ЦБ, в особенности выраженное в самом северном из изученных водоисточников — Шершнёвском водохранилище (III климатический пояс). Так, если в 2010 г. в местах водозаборов Челябинска содержание ЦБ более 2500 кл/мл фиксировали в июне — сентябре, то в 2021 г. такие концентрации синезелёных водорослей регистрировали на протяжении 11 месяцев (февраль — декабрь) [35]. Аналогичная тенденция отмечена и в р. Дон (см. **рисунок**), где продолжительность активного периода вегетации ЦБ увеличилась



Среднемесечная сезонная динамика синезелёных водорослей в воде р. Дон у питьевого водозабора Ростова-на-Дону (2019–2023 гг.).
Monthly average seasonal trend of the the blue-green algae in the Don River water near the drinking water intake in Rostov-on-Don in 2019–2023 years.

с трёх месяцев (июль – сентябрь) в 2019 г. до шести (июнь – ноябрь) в 2023 г.

Кроме того, выявлены региональные особенности внутриродовой дифференциации токсичных видов ЦБ (табл. 1).

Так, в воде Москворецкого водоисточника Москвы (II климатический пояс), где в 2023 г. содержание клеток сине-зелёных водорослей составляло более 2500 кл/мл на протяжении пяти месяцев (с июля по ноябрь), доминирующим видом (до 90% от общей численности) являлся *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs, продуцирующий несколько видов токси-

нов: микроцистин-LR, анатоксин-а, БМАА, цилиндроспермопсин, сакситоксин. На водозаборах Волжского источника Москвы с концентрацией ЦБ от 267 до 3978 кл./мл от 18 до 100% от общей численности ЦБ составляли *Microcystis aeruginosa*, являющиеся продуцентами преимущественно одного токсина – гепатоканцерогена микроцистина-LR. В воде Шершнёвского водохранилища Челябинска, расположенного в III климатическом поясе, чаще обнаруживались следующие виды синезелёных водорослей: *Planktothrix agardhii* – до 45,5%; *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs

Таблица 1 / Table 1

Приоритетные роды цианобактерий, обнаруженные в источниках питьевого водоснабжения Москвы, Челябинска и Ростова-на-Дону в 2009–2023 гг., и продуцируемые ими цианотоксины

Priority cyanobacteria (CB) genera identified in drinking water sources in Moscow, Chelyabinsk, and Rostov-on-Don in 2009–2023 and cyanotoxins produced by them

Род ЦБ CB genera	Цианотоксин Cyanotoxin					Водоисточник Water source
	Микроцистин-LR Microcystin-LR	Анатоксин-а Anatoxin-a	Цилиндроспермопсин Cylindrospermopsin	БММА BMMA	Сакси-токсин Saxitoxin	
<i>Aphanizomenon</i>	+	+	+	+	+	Москва-река, р. Дон, р. Волга, Шершнёвское водохранилище Moskva-River, Don River, Volga River, Shershnevskoye Reservoir
<i>Microcystis</i>	+	+	–	+	–	р. Волга, р. Дон, Москва-река, Шершнёвское водохранилище Volga River, Don River, Moskva River, Shershnevskoye Reservoir
<i>Anabaena</i>	+	+	+	+	+	р. Дон, Москва-река, р. Волга Don River, Moscow River, Volga River
<i>Synechocystis</i>	–	+	–	–	–	р. Дон / Don River
<i>Planktothrix</i>	+	+	+	–	+	Шершнёвское водохранилище Shershnevskoye Reservoir
<i>Oscillatoria</i>	+	+	+	–	+	Москва-река / Moskva River
<i>Phormidium</i>	–	+	–	+	+	р. Волга / Volga River

Примечание. Полу жирным шрифтом выделен водоисточник, в котором род ЦБ является доминирующим.
Note: The water source in which the genus CB is dominant is highlighted in bold.

Таблица 2 / Table 2

Концентрации цианотоксинов (min – max), обнаруженные в источниках хозяйственно-питьевого водоснабжения Москвы, Челябинска и Ростова-на-Дону в 2022–2023 гг.

Cyanotoxins' concentrations (min – max) revealed in sources of household and drinking water supply in Moscow, Chelyabinsk, and Rostov-on-Don in 2022–2023

Цианотоксин Cyanotoxin	Концентрация, мкг/л / Concentration, µg/L		
	Река Москва Moskva River	Шершнёвское водохранилище Shershnevskoye Reservoir	Река Дон Don River
Микроцистин-LR Microcystin-LR	от 0.02 до > 5 from 0.02 up to > 5	от < 0.1 до > 5 from < 0.1 up to > 5	от < 0.15 до 0.5 from < 0.15 up to 0.5
Анатоксин-а Anatoxin-a	0.01–1.2	от < 0.1 до 2.5 from < 0.1 up to 2.5	от < 0.1 до 2.5 from < 0.1 up to 2.5
Цилиндроспермопсин Cylindrospermopsin	от < 0.04 до 0.14 from < 0.04 up to 0.14	от < 0.04 до 0.65 from < 0.04 up to 0.65	от < 0.04 до 0.09 from < 0.04 up to 0.09
БМАА BMAA	0.16–50.65	от < 4 до 34.85 from < 4 up to 34.85	от < 4 до 17.0 from < 4 up to 17.0
Сакситоксин Saxitoxin	0.01–0.02	от < 0.015 до 0.04 from < 0.015 up to 0.04	от < 0.015 до 0.04 from < 0.015 up to 0.04

и *Aphanizomenon issatschenkoi* – до 19%; *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis pulvereae*, *Microcystis wesenbergii*, *Microcystis firma* – до 11% от общего состава ЦБ [35]. Максимальное количество ЦБ обнаружено на р. Дон – водоисточнике Ростова-на-Дону (I климатический пояс): 291 820 кл./мл (сентябрь 2023 г.) с превалированием родов *Synechocystis*, *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* [36].

В составе ЦБ всех четырёх исследованных водоисточников (Москворецкий и Волжский водоисточники Москвы, Шершнёвское водохранилище, р. Дон) чаще других обнаруживали токсичные рода ЦБ *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Microcystis*. Идентификация токсичных родов ЦБ может дать информацию как о наличии процессов цветения, не обнаруживаемых невооружённым глазом, так и о потенциальном присутствии цианотоксинов.

Химико-аналитические исследования воды источников хозяйственно-питьевого водоснабжения и питьевой воды Москвы (Москворецкий водоисточник), Челябинска и Ростова-на-Дону, проведённые в 2023 г., зафиксировали содержание ряда цианотоксинов (микроцистина-LR, анатоксина-а, цилиндропермопсина, β-N-метиламино-1-аланина и сакситоксина) в концентрациях, превышающих нижний предел количественного определения. Концентрации цианотоксинов, обнаруженные в ходе мониторинга в сезоны цветения водоисточников, представлены в табл. 2.

Сравнение результатов исследования Москворецкого водоисточника Москвы 2023 г. с данными за аналогичный период 2016 г. [37] демонстрирует негативную динамику содержания цианотоксинов. Так, в 2016 г. максимальные уровни микроцистина-LR на водозаборах составляли 0,3 мкг/л, анатоксина-а – 0,3 мкг/л, БМАА – 24,8 мкг/л, а в 2023 г. концентрация микроцистина-LR увеличилась более чем в 16 раз, и в 65% отобранных проб она превышала верхний предел метода измерения. Содержание анатоксина-а возросло в 4 раза, БМАА – в 2 раза. В воде источника появились цилиндропермопсин и сакситоксин, которые в 2016 г. не обнаруживались (концентрация составляла < 0,05 мкг/л).

Микроцистины считаются наиболее распространёнными цианотоксинами в пресных водах по всему миру [38, 39]. В настоящее время определено более 70 микроцистинов, при этом чаще встречается и является более токсичным микроцистин-LR [40]. Результаты эпидемиологических исследований свидетельствуют о положительной корреляции между концентрацией микроцистина-LR и гепатотоксичностью [41]. Международное агентство по изучению рака в 2010 г. включило микроцистин-LR в группу 2В канцерогенности [42]. В 2018 г. в нашей стране научно обоснована и внедрена в практику предельно допустимая концентрация (ПДК) микроцистина-LR в воде водных объектов хозяй-

ственно-питьевого и культурно-бытового водопользования и питьевой воде (0,001 мг/л с пометкой «к» (канцероген), 1-й класс опасности¹), утверждён метод определения микроцистина-LR в воде². За основу был взят опыт ВОЗ и 22 стран по нормированию, а также данные мировой литературы о токсическом действии микроцистина-LR на организм человека и лабораторных животных [17].

Одним из самых нейротоксичных соединений считается цианотоксин анатоксин-а, поскольку скорость ингибирования ацетилхолина у него выше, чем у большинства фосфорорганических инсектицидов [9]. Чаще других продуцентами анатоксина-а являются ЦБ родов *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Plankthothrix*, *Microcystis*, *Cylindrospermum*, *Phormidium* и *Aphanizomenon* [9]. Несмотря на мнение ВОЗ о недостаточности доказательств токсичности анатоксина-а для установления безопасного уровня его содержания в воде [30], многие страны, в том числе некоторые штаты США, Новая Зеландия, установили собственные нормативы на уровне от 1 до 6 мкг/л [43]. В исследованиях, проведённых на белых крысах в ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, у животных выявлены нарушения белкового и жирового обмена, лейкоцитарного роста крови, морфофункциональные изменения в семенниках, тимусе, железе, толстом кишечнике, поджелудочной железе, надпочечниках в результате внутрижелудочного поступления анатоксина-а в дозе 1 мкг/кг в условиях субхронического эксперимента. Эмбрио- и репротоксические, а также нейротоксические эффекты цианотоксина в дозах ≤ 1 мг/кг в опыте не зарегистрированы [44]. На основании результатов собственных исследований и анализа данных научной литературы обоснована ПДК анатоксина-а в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: 4 мкг/л, санитарно-токсикологический показатель вредности, второй класс опасности. Для контроля содержания анатоксина-а в воде разработан и утверждён метод определения³ с нижним пределом количественного измерения 0,05 мкг/л.

ЦБ родов *Cylindrospermopsis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Umezakia*, *Raphidiopsis*, *Lyngbya* продуцируют цианотоксин цилиндропермопсин [9]. Цилиндропермопсин ингибирует синтез белка, цито- и генотоксичен, вызывает

¹ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

² МУК 4.1.3552–19 «Определение микроцистина-LR в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования и питьевой воде методом иммуноферментного анализа».

³ МУК 4.1.4055–24 «Количественное определение анатоксина-а в питьевой и природной воде методом иммуноферментного анализа».

Таблица 3 / Table 3

Концентрации цианотоксинов (min – max) в водоисточнике, питьевой воде и эффективность очистки на Западной станции водоподготовки Москвы, 2023 г.

Cyanotoxins concentrations (min – max) in water source, drinking water and treatment efficiency at the Western Water Treatment Plant of Moscow, 2023

Цианотоксин Cyanotoxin	ПДК, мкг/л MPC, µg/L	Исходная вода, мкг/л Source water, µg/L	Питьевая вода, мкг/л Drinking water, µg/L	Эффективность очистки, % Cleaning efficiency, %
Микроцистин-LR / Microcystin-LR	1.0	0.55 / > 5.0	0.23 / 1.09	58 / 78
Анатоксин-а / Anatoxin-a	4.0	0.29 / 1.22	0.32 / 1.38	–10 / –13
Цилиндроспермопсин / Cylindrospermopsin	1.0	0.09 / > 1.0	0.08 / 0.82	11 / 18
БМАА / BMAA	1000	10.2 / 50.65	13.5 / 60.57	–32 / –19.6
Сакситоксин / Saxitoxin	–	0.01 / 0.02	0.013 / 0.3	–30 / –93

повреждение внутриклеточных органелл различных тканей и органов, инициирует процессы канцерогенеза [45]. В настоящее время нормативы содержания цилиндропермопсина в питьевой воде установлены в некоторых странах (Австралия, Бразилия, Новая Зеландия) на уровне от 1 до 15 мкг/л [46]. ВОЗ считает, что доказательств токсичности цилиндропермопсина для установления безопасного уровня его содержания в воде недостаточно [30]. В собственных экспериментальных исследованиях в условиях субхронического токсикологического эксперимента на лабораторных животных при внутрижелудочном поступлении цилиндропермопсина в организм в дозе 10 мкг/кг установлено достоверное увеличение содержания аланинаминотрансферазы, аспартатаминотрансферазы, глюкозы, креатинина, триглицеридов при одновременном снижении альбумина, мочевой кислоты, мочевины и общего белка в сыворотке крови. Морфофункциональные нарушения у животных подтверждали преимущественно нарушение нормальной работы печени и почек. Кроме того, выявлены нарушения когнитивных функций у подопытных животных. Эмбриотоксическое и тератогенное действие при введении доз ≤ 10 мкг/кг не зафиксировано. С учётом полученных данных, а также результатов анализа зарубежных материалов по регулированию и контролю содержания цилиндропермопсина в воде водных объектов и питьевой воде обоснована ПДК в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: 1 мкг/л, санитарно-токсикологический показатель вредности, первый класс опасности. Для контроля содержания цилиндропермопсина в воде разработан метод на основе иммуноферментного анализа⁴ с диапазоном количественного измерения 0,05–2 мкг/л.

К сильнодействующим токсинам цианобактерий относится также небелковая кислота β -N-метиламино-1-аланин (БМАА), которую продуцируют такие виды ЦБ, как *Chroococcus*, *Merismopedia*, *Microcystis*, *Synechocystis*, *Myxosarcina*, *Leptolyngbya*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Nostoc* [47]. Нейротоксин БМАА считается причиной нейродегенеративных болезней, в том числе бокового амиотрофического склероза, паркинсонизма, деменции, развивающихся в отдалённые сроки жизни [47]. На основании анализа отечественных и зарубежных источников литературы и результатов собственных исследований влияния БМАА на органолептические свойства воды (пороговая концентрация – 10 мг/л по изменению запаха воды), процессы самоочищения водных объектов (пороговая концентрация – 3 мг/л по изменению БПК) и организм теплокровных животных (максимальная недеятельная доза 0,05 мг/кг) обоснована ПДК БМАА в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: 1 мг/л, санитарно-токсикологический показатель вредности, третий класс опасности. Для проведения контроля разработан проект методических указаний по определению содержания БМАА в питьевой и природной воде методом иммуноферментного анализа с нижним пределом количественного измерения 0,005 мг/л.

⁴ МУК 4.1.4112–25 «Определение цилиндропермопсина в питьевой и природной воде методом иммуноферментного анализа».

Поскольку основным путь попадания цианотоксинов в организм человека – использование воды, содержащей ЦБ и цианотоксины, для питьевых целей [48], большое значение для обеспечения нормативного качества питьевой воды имеют применяемые технологии водоочистки. Высокие концентрации водорослей осложняют процесс водоподготовки. Синезелёные водоросли характеризуются относительно малыми размерами и плохо удаляются при коагулировании, проходят через загрузку песчаных фильтров, поэтому станции водоподготовки вынуждены применять высокие дозы коагулянта, дополнительно вводить флокулянт, сокращать время фильтроцикла, увеличивать интенсивность промывки фильтрующей загрузки [33]. Применяемые меры позволяют повысить эффективность очистки исходной воды от клеток ЦБ до 99,8%, при этом максимальное количество клеток ЦБ удаляется с основной массой взвешенных веществ в отстойниках и на песчаных фильтрах [49].

Проведённые в 2016 г. сравнительные исследования содержания цианотоксинов в воде водоисточника и питьевой воде Рублёвской станции водоподготовки Москвы, где очистка воды проходила по традиционной двухступенчатой схеме с последующим озонированием и фильтрацией через фильтры с активированным гранулированным углём и песчаные фильтры с кварцевым песком, показали снижение концентрации БМАА на 45%, микроцистина-LR – на 100%. В отношении анатоксина-а существовавшая схема водоподготовки оказалась неэффективной. При содержании токсина в исходной воде меньше нижнего предела обнаружения (0,05 мкг/л) его концентрация в питьевой воде возрастала в 3,5 раза, что, вероятно, связано с поступлением токсина в воду при разрушении клеток ЦБ в процессе водоподготовки [49].

Несколько иная эффективность очистки воды от цианотоксинов зафиксирована в 2023 г. при обследовании Западной станции водоподготовки Москвы, где наряду с классическими технологиями водоочистки и озонсорбции применяется ультрафильтрация (табл. 3). Содержание микроцистина-LR снижалось в среднем на 58% от исходного уровня загрязнения, с уменьшением концентрации эффективность очистки возрастала до 78%. В отношении БМАА наибольшую эффективность показал этап двухступенчатого озонирования и многослойной фильтрации – 39,1%. Тем не менее содержание БМАА в питьевой воде после прохождения технологической линии очистки превысило его содержание в исходной воде в 1,3 раза. В питьевой воде концентрации анатоксина-а и сакситоксина возрастали на 13 и 93% соответственно. Эффективность вышеописанной схемы для очистки от цилиндропермопсина составила от 11 до 18%.

Обсуждение

Таким образом, полученные результаты мониторинга количественного и качественного состава ЦБ и наиболее опасных цианотоксинов (микроцистина-LR, анатоксина-а, цилиндропермопсина, БМАА и сакситоксина) в поверхностных источниках водоснабжения, расположенных в основных (I, II и III) климатических поясах Российской

Таблица 4 / Table 4

Алгоритм текущего мониторинга загрязнения воды ЦБ и цианотоксинами и корректирующие профилактические мероприятия
Algorithm for current monitoring of water pollution by CB and cyanotoxins and corrective preventive measures

Уровень опасности Danger level	Характеристики опасности Characteristics hazard	Корректирующие профилактические мероприятия Corrective preventive measures
Низкий Low	Цианобактерии < 2500 кл/мл Cyanobacteria < 2500 cells/mL	Визуальное наблюдение за цветением вод — ежедневно. Мониторинг числа клеток цианобактерий — еженедельно Visual observation of algal blooms is carried out daily. Cyanobacteria cell counts are monitored weekly
Средний Intermediate	Цианобактерии — 2500–6500 кл./мл Цианотоксины в воде источника ≤ 0,3 ПДК; в питьевой воде ≤ 0,5 ПДК Cyanobacteria — 2500–6500 cells/mL Cyanotoxins in source water ≤ 0.3 MAC; in drinking water ≤ 0.5 MAC	Мониторинг цианобактерий — 2 раза в неделю. Определение темпа роста популяций токсигенных видов цианобактерий. Оценка токсичности воды. При увеличении или преобладании токсичных видов цианобактерий — мониторинг цианотоксинов в воде источника и питьевой воде Cyanobacteria monitoring — twice a week. Determining the population growth rate of toxigenic cyanobacteria species. Water toxicity assessment. If toxic cyanobacteria species increase or predominate, monitoring cyanotoxins in source water and drinking water
Высокий High	Цианобактерии > 6500 кл/мл Наличие токсигенных цианобактерий. Цианотоксины в воде источника ≤ 0,8 ПДК; в питьевой воде ≤ ПДК Cyanobacteria > 6500 cells/mL Presence of toxigenic cyanobacteria. Cyanotoxins in source water ≤ 0.8 MAC; in drinking water ≤ MAC	Гигиеническая оценка опасности для здоровья населения концентраций цианотоксинов в питьевой воде, эффективности очистки на водозаборных сооружениях. Разработка рекомендаций водоканалам и населению по методам водоподготовки. Мониторинг цианотоксинов в воде источника и питьевой воде Hygienic assessment of the public health hazard of cyanotoxin concentrations in drinking water and the effectiveness of treatment at water intake facilities. Development of recommendations for water utilities and the public on water treatment methods. Monitoring of cyanotoxins in source water and drinking water
Очень высокий Very high	Цианобактерии > 6500 кл/мл Наличие <i>Microcystis aeruginosa</i> , токсигенных цианобактерий. Цианотоксины в воде источника > 0,8 ПДК; в питьевой воде > ПДК Cyanobacteria > 6500 cells/mL Presence of <i>Microcystis aeruginosa</i> , a toxigenic cyanobacteria. Cyanotoxins in source water > 0.8 MAC; in drinking water > MAC	Информирование органов государственного и местного управления, водоканалов. Рекомендации населению по дополнительной очистке питьевой воды. Оценка токсичности воды источника и определение концентрации цианотоксинов в воде. Поиск альтернативного источника водоснабжения. При получении трёх последовательных отрицательных результатов определения цианотоксинов в воде источника и питьевой воде — продолжение мониторинга в соответствии с уровнем опасности Informing state and local government agencies and water utilities. Recommendations for the public on additional drinking water treatment. Assessing the toxicity of source water and determining cyanotoxin concentrations in the water. Finding an alternative water source. If 3 consecutive negative results are received for cyanotoxins in source water and drinking water, monitoring is continued in accordance with the hazard level

Федерации, свидетельствуют об актуальности для нашей страны проблемы цветения воды. Наличие цианотоксинов и недостаточная технологическая эффективность водоочистки представляют риски для здоровья населения. Выявленные незначительные отличия в эффективности очистки питьевой воды на станциях водоподготовки со схожими технологическими схемами, но отличающимися методом заключительной фильтрации (песчаные фильтры или ультрафильтрация), позволяют предположить, что степень удаления цианотоксинов определяется не только применяемыми технологиями, но и различиями в интенсивности загрязнения фильтрующих загрузок, а также концентрациями цианотоксинов в исходной воде.

С целью минимизации рисков для здоровья, связанных с присутствием токсичных ЦБ в воде, используемой для питьевых целей, а также для рекреационных водных мероприятий, необходимы профилактические меры.

Прежде всего с целью минимизации процессов цветения водоисточников необходима оценка факторов, способствующих массовому росту и развитию ЦБ. Такой анализ может быть сделан на основании следующей информации:

- характеристика водоёма (размер, глубина, течение и расход, температурная стратификация) и изменение этих характеристик (например, длительные периоды застоя или понижение уровня воды);
- качество исходной воды (уровень питательных веществ (общий фосфор, общий азот), мутность, pH, уровень растворённого кислорода, температура воды);

- сезонные и погодные факторы (вне и внутри пика цветения, температура, преобладающие сила и направление ветра, количество осадков) и изменения этих факторов;
- частота возникновения цветения и появление токсичных видов ЦБ и цианотоксинов в источнике воды или близлежащих водоёмах;
- сезонные изменения качества воды;
- факторы на территории водосбора, которые могут повлиять на качество воды в водоёмах;
- основные источники загрязнения водного объекта и состав сбрасываемых сточных вод.

Необходимо анализировать ретроспективные данные о количестве и видах клеток ЦБ или оценивать их биообъём в исходной воде, учитывать информацию о токсинах, что может способствовать лучшему пониманию требований к очистке, потенциальных потребностей в оптимизации работы очистных сооружений и эффективности удаления цианотоксинов.

Признаками цветения вод, выявляемыми при визуальном осмотре мест водозаборов и зон рекреации, являются:

- изменение цвета поверхностных вод (например, появление зелёного, белого, коричневого, красного или синего оттенков);
- повышение мутности;
- скопления пены на береговой линии и поверхности воды;
- неприятный запах;
- наличие погибшей рыбы или погибших птиц на берегу и в воде.

Кроме того, целесообразно принимать во внимание сезонные изменения технологии очистки (сокращение времени работы фильтрующих загрузок, увеличение расхода химических реагентов), а также наличие сходных по характеру жалоб на качество воды, в том числе на неприятные запахи.

Для объективной оценки рисков, связанных с загрязнением ЦБ и цианотоксинами, необходим текущий мониторинг воды водоисточника, воды водоёмов, используемых для рекреации населения, воды на различных этапах водоподготовки, питьевой воды систем централизованного холодного водоснабжения.

Профилактические мероприятия должны включать оптимизацию существующей технологии очистки в отношении ЦБ и в первую очередь наиболее опасных цианотоксинов микроцистина-LR, анатоксина-а, цилиндропермолпсина, БМАА, сакситоксина. Для этого необходимы:

- разделение этапов очистки на низкую дозу предварительного окисления для усиления флокуляции и более высокую дозу после удаления клеток для окисления растворённых токсинов;
- повышение эффективности промывки фильтрующей загрузки в период цветения;
- замена фильтрующей загрузки (в случае неэффективности изменения режима промывки);
- внедрение современных технологий очистки, эффективных в отношении ЦБ и цианотоксинов, в том числе озонирования с сорбцией на активированном угле, мембранного фильтрования и др.;

- регулярный мониторинг эффективности очистки для обеспечения безопасности, особенно в отношении удаления цианотоксинов из питьевой воды.

При этом любые изменения в методах очистки, направленные на снижение концентрации токсинов, должны быть адаптированы к роду (родам) присутствующих ЦБ и качеству воды на конкретном участке (например, pH, температура, мутность, наличие природных органических веществ).

Алгоритм текущего мониторинга загрязнения воды ЦБ и цианотоксинами с оценкой опасности для здоровья человека и корректирующими действиями представлен в табл. 4.

Заключение

Поверхностные водоисточники в Российской Федерации подвержены массовому росту и развитию ЦБ, генерирующих опасные для жизни и здоровья человека цианотоксины. Это определяет необходимость постоянного мониторинга процессов цветения, проведения профилактических мероприятий, в том числе направленных на защиту водоисточника от загрязнения биогенными элементами, совершенствования технологических процессов водоподготовки.

С целью минимизации риска для здоровья, связанного с массовым развитием ЦБ в водных объектах, используемых для питьевых целей и рекреационных мероприятий, а также обеспечения единого подхода при мониторинге необходима разработка методических рекомендаций по контролю загрязнения токсичными видами ЦБ и цианотоксинами воды водоисточников хозяйственно-питьевого, культурно-бытового водопользования и питьевой воды.

Литература

(п.п. 9, 10, 13, 21, 22, 24, 25, 29–31, 38, 40–43, 45, 46 см. References)

1. Указ Президента РФ № 474 «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года»; 2020.
2. Рахманин Ю.А., Онищенко Г.Г. Гигиеническая оценка питьевого водоснабжения населения Российской Федерации: проблемы и пути рационального их решения. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(10): 1158–66. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1158-1166> <https://elibrary.ru/hkiarc>
3. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году». М.; 2024.
4. Кузовлев В.В., Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Чекмарева Е.А. Содержание биогенных веществ в воде озера Песью и Удомля. В кн.: *Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Труды VI Всероссийского симпозиума с международным участием*. Барнаул; 2017: 120–3. <https://elibrary.ru/vvkgzlz>
5. Хамидулина Х.Х., Проскурина А.С. О мерах по снижению риска воздействия цианотоксинов на здоровье населения путем регулирования фосфатов в составе синтетических моющих средств. *Токсикологический вестник*. 2020; (3): 3–8. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2020-3-3-8> <https://elibrary.ru/abazuu>
6. Кевбрина М.В., Гаврилов Д.В., Белов Н.А., Агарев А.М. Промышленные испытания с переводом одного первичного отстойника в режим ацидофикации на Курьяновских очистных сооружениях. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2023; (2): 46–52. <https://doi.org/10.35776/VST.2023.02.06> <https://elibrary.ru/pemsbk>
7. Пименова Е.В. *Химические методы анализа в мониторинге водных объектов*. Пермь; 2012. <https://elibrary.ru/qkzjzj>
8. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Первый двухгодичный доклад Российской Федерации по вопросам транспарентности. М.; 2024.
9. Шевырёв С.Л., Анциферова Г.А., Русова Н.И. Вселение чужеродных видов цианобактерий в водоемы средних широт в условиях высоких летних температурных аномалий воздуха. *Успехи современного естествознания*. 2018; (11–2): 407–12. <https://elibrary.ru/vomrlr>
10. Намсараев З., Мельникова А., Комова А., Иванов В., Руденко А., Иванов Е. Возникновение и последствия цветения водорослей в России. *Вода*. 2020; 12(1): 285. <https://doi.org/10.3390/w12010285>
11. Кравцова А.В., Ходоровская Н.И., Дерябина Л.В. Комплексная характеристика состояния Шершеневского водохранилища (Россия, г. Челябинск). *Биологические науки. Научное обозрение*. 2023; (1): 85–90.
12. Григорьева Е.В., Ксенофонтов Б.С. Влияние фитопланктона на качество воды. В кн.: *Россия в XXI веке в условиях глобальных вызовов: проблемы управления рисками и обеспечения безопасности социально-экономических и социально-политических систем и природно-техногенных комплексов. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции*. Том 2. М.; 2022: 173–5. <https://elibrary.ru/gnxyge>
13. Пауков А.Г., Тептина А.Ю., Кутлина Н.А., Шахматов А.С., Павловский Е.В. *Водоросли: цианобактерии, красные, зеленые и харовые водоросли*. Екатеринбург; 2017. <https://elibrary.ru/yimiwd>
14. 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(11): 1046–52. <https://elibrary.ru/slxzjn>
15. Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Дефицит растворенного кислорода в условиях массового развития синезеленых водорослей на Куйбышевском водохранилище. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2022; (4): 38–53. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_4_3 <https://elibrary.ru/bxldij>
16. Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Сезонные изменения растворенного кислорода в воде Куйбышевского водохранилища. В кн.: Байраков И.А., Лушкин И.А., ред. *Природопользование и устойчивое развитие регионов России: Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции*. Пенза; 2022: 3–7. <https://elibrary.ru/cgxwis>
17. Румянцев В.А., Крюков Л.Н. «Цветение» воды — угроза экологической безопасности. *Известия географического общества*. 2013; 145(2): 1–9.
18. Каминский Д.И., Лобанов А.Б., Рожков К.К., Мазрухо А.Б. Совершенствование питательных сред для выращивания некоторых возбудителей опасных инфекционных заболеваний. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2017; (2): 104–10. <https://doi.org/10.36233/0372-9311-2017-2-104-110> <https://elibrary.ru/afkdjo>
19. Неверова-Дзюпа Е.В., Цветкова Л.И. *Оценка трофического состояния поверхностных вод*. СПб.; 2020. <https://elibrary.ru/koldtw>
20. Сорокикова Е.Г. Синезеленая угроза. *Наука из первых рук*. 2010; 6(36). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sine-zelenaya-ugroza> (дата обращения: 26.01.2026).
21. Волошко Л.Н., Плюш А.В., Титова Н.Н. Токсины цианобактерий (CYANOBACTERIA, CYANOPHYTAS). *Альгология*. 2008; 18(1): 3–20.
22. Кузь Н.В. Информационные технологии анализа и оценки содержания геосмина в воде. *Информационные и телекоммуникационные технологии*. 2018; (39): 50–61. <https://elibrary.ru/yreflv>
23. Шушкевич Е.В., Карпушенко А.В., Полянин В.О., Столярова Е.А. Водоподготовка и управление качеством воды в условиях развития фитопланктона на примере Московского водоисточника. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2010; (10–1): 13–5. <https://elibrary.ru/mvrrer>
24. Шушкевич Е.В., Бабаев А.В., Смирнов А.В., Сураева Н.О., Григорьев А.С. Совершенствование технологии очистки воды на Западной станции водоподготовки. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2011; (10): 7–11. <https://elibrary.ru/oilqlyv>

Original article

35. Турбинский В.В., Брагина И.В., Кузь Н.В., Силицына О.О., Пушкарева М.В. Проблема цветения воды источников питьевого водоснабжения населения. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(12): 1466–72. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-12-1466-1472> <https://elibrary.ru/fvwkpd>
36. Кузь Н.В., Турбинский В.В., Силицына О.О. Токсичное «цветение» реки Дон – водоисточника Ростова-на-Дону. В кн.: *Эрисмановские чтения – 2023. Новое в профилактической медицине и обеспечении санитарно-эпидемиологического благополучия населения: Материалы I Всероссийского научного конгресса с международным участием*. Мытищи; 2023: 144–6. <https://elibrary.ru/aahkfr>
37. Кузь Н.В. Динамика загрязнения цианотоксинами воды реки Москвы. В кн.: *Сборник материалов XIV международного симпозиума «Экология человека и медико-биологическая безопасность населения»*. Крым; 2024: 137–40.
39. Волошко Л.Н., Пиневиц А.В. Разнообразие токсинов цианобактерий. *Астраханский вестник экологического образования*. 2014; (1): 68–80. <https://elibrary.ru/rxbfsf>
44. Силицына О.О., Турбинский В.В., Пушкарева М.В., Кузь Н.В., Масальцев Г.В., Ширяева М.А. и др. экспериментальное изучение морфо-функциональных изменений внутренних органов животных при пероральном поступлении цилиндроспермопсина в условиях хронического воздействия. *Токсикологический вестник*. 2024; 32(6): 336–47. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-6-336-347> <https://elibrary.ru/jltisi>
47. Кокшарова О.А., Сафронова Н.А. Непротеиногенная аминокислота β-N-метиламино-L-аланин (ВМАА): биологическая активность и экологическое значение. *Токсины*. 2022; 14(8): 539. <https://doi.org/10.3390/toxins14080539>
48. 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; 47(2): 218–29. <https://doi.org/10.31857/S0321059620020182> <https://elibrary.ru/ffniji>
49. Кузь Н.В., Силицына О.О. Проблема «цветения» водоисточников. Оценка влияния процессов водоподготовки на содержание цианобактерий в питьевой воде хозяйственно-питьевого водоснабжения города Москвы. *Здоровье населения и среда обитания – 3HuCO*. 2017; (9): 38–42. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2017-294-9-38-42> <https://elibrary.ru/zjubep>

References

1. Decree of the President of the Russian Federation № 474 «On the National Development Goals of the Russian Federation for the period up to 2030»; 2020.
2. Rakhmanin Yu.A., Onishchenko G.G. Hygienic assessment of drinking water supply of the population of the Russian Federation: problems and the way their rational decision. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(10): 1158–66. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1158-1166> <https://elibrary.ru/hkiarc> (in Russian)
3. State report «On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2023». Moscow; 2024. (in Russian)
4. Kuzovlev V.V., Grigorieva I.L., Komissarov A.B., Chekmareva E.A. Content of biogenic elements in water of lakes Pesvo and Udomlya. In: *Organic Matter and Biogenic Elements in Inland Waters and Marine Waters: Proceedings of the VI All-Russian Symposium with International Participation [Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh: Trudy VI Vserossiiskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem]*. Barnaul; 2017: 120–3. <https://elibrary.ru/vvkgzl> (in Russian)
5. Khamidulina Kh.Kh., Proskurina A.S. About measures to reduce the risk of cyanotoxins exposure to the health of population by regulating phosphates in synthetic detergents. *Toksikologicheskii vestnik*. 2020; (3): 3–8. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2020-3-3-8> <https://elibrary.ru/abazuu> (in Russian)
6. Kevbrina M.V., Gavrilo D.V., Belov N.A., Agarev A.M. Industrial tests at the Kur'ianovskie wastewater treatment facilities involving the transfer of one primary settling tank into the acidification mode. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2023; (2): 46–52. <https://doi.org/10.35776/VST.2023.02.06> <https://elibrary.ru/pembsk> (in Russian)
7. Pimenova E.V. *Chemical Analysis Methods in Monitoring of Water Bodies [Khimicheskie metody analiza v monitoringe vodnykh ob'ektov]*. Perm'; 2012. <https://elibrary.ru/qkqkzi> (in Russian)
8. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. The first biennial report of the Russian Federation on transparency. Moscow; 2024. (in Russian)
9. Chorus I., Bartram J., eds. *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. WHO; 1999.
10. Chonudomkul D., Yongmanitchai W., Theeragool G., Kawachi M., Kasai F., Kaya K., et al. Morphology, genetic diversity, temperature tolerance and toxicity of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanobacteria) strains from Thailand and Japan. *FEMS Microbiol. Ecol.* 2004; 48(3): 345–55. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2004.02.014>
11. Shevryev S.L., Antsiferova G.A., Rusova N.I. Immigration of the alien cyanobacteria into the basins of middle latitude territories under conditions of high temperature air anomalies. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2018; (11–2): 407–12. <https://elibrary.ru/vomrlo> (in Russian)
12. Namsaraev Z., Melnikov A., Komova A., Ivanov V., Rudenko A., Ivanov E. Algal bloom occurrence and effects in Russia. *Water*. 2020; 12(1): 285. <https://doi.org/10.3390/w12010285>
13. Igwaran A., Kayode A.J., Moloantoa K.M., Khetsha Z.P., Unuofin J.O. Cyanobacteria harmful algae blooms: causes, impacts, and risk management. *Water Air Soil Pollut.* 2024; 235: 71. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06782-y>
14. Kravtsova A.V., Khodorovskaya N.I., Deryabina L.V. Complex characteristics of the state of the Shershevsky reservoir (Russia, Chelyabinsk). *Biologicheskie nauki. Nauchnoe obozrenie*. 2023; (1): 85–90. (in Russian)
15. Grigor'eva E.V., Ksenofontov B.S. The influence of phytoplankton on water quality. In: *Russia in the 21st Century in the Context of Global Challenges: Problems of Risk Management and Ensuring the Safety of Socio-Economic and Socio-Political Systems and Natural and Man-Made Complexes. Collection of Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Volume 2 [Rossiya v XXI veke v usloviyakh global'nykh vyzovov: problemy upravleniya riskami i obespecheniya bezopasnosti sotsial'no-ekonomicheskikh i sotsial'no-politicheskikh sistem i prirodno-tekhnogennykh kompleksov. Sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Tom 2]*. Moscow; 2022: 173–5. <https://elibrary.ru/gnxrye> (in Russian)
16. Paukov A.G., Teptina A.YU., Kutlina N.A., Shakhmatov A.S., Pavlovskii E.V. *Algae: Cyanobacteria, Red, Green and Brown Algae [Vodorosli: tsianobakterii, krasnye, zelenye i kharovye vodorosli]*. Ekaterinburg; 2017. <https://elibrary.ru/yimiwd> (in Russian)
17. Egorova N.A., Kuz N.V., Sinityna O.O. Materials for the substantiation of hygienic standard of microcystin-Lr in water of water objects. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(11): 1046–52. <https://elibrary.ru/slxzjn> (in Russian)
18. Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Dissolved oxygen deficiency in the conditions of anthropogenic eutrophication of the Kuibyshev reservoir. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2022; (4): 38–53. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_4_3 <https://elibrary.ru/bxldij> (in Russian)
19. Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Seasonal changes in dissolved oxygen in the water of the Kuibyshev reservoir. In: Bairakov I.A., Lushkin I.A., eds. *Environmental Management and Sustainable Development of Russian Regions: Collection of Articles of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference [Prirodopol'zovanie i ustoychivoe razvitiye regionov Rossii: Sbornik statei IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii]*. Penza; 2022: 3–7. <https://elibrary.ru/cgxwis> (in Russian)
20. Rumyantsev V.A., Kryukov L.N. Water bloom, a threat to environmental safety. *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2013; 145(2): 1–9. (In Russ.)
21. Kaminsky D.I., Lobanov V.V., Rozhkov K.K., Mazrukho A.B. Evaluation of nutrient media to grow some infection diseases causative agents. *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii*. 2017; (2): 104–10. <https://doi.org/10.36233/0372-9311-2017-2-104-110> <https://elibrary.ru/afkdjo> (in Russian)
22. Zinder S.H., Doemel W.N., Brock T.D. Production of volatile sulfur compounds during the decomposition of algal mats. *Appl. Environ. Microbiol.* 1977; 34(6): 859–60. <https://doi.org/10.1128/aem.34.6.859-860.1977>
23. Achá D., Guédon S., Amouroux D., Point D., Lazzaro X., Fernandez P.E., et al. Algal bloom exacerbates hydrogen sulfide and methylmercury contamination in the emblematic high-altitude Lake Titicaca. *Geosciences*. 2018; 8(12): 438. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120438>
24. Neverova-Dziopak E.V., Tsvetkova L.I. *Assessment of the Trophic State of Surface Waters [Otsenka troficheskogo sostoyaniya poverkhnostnykh vod]*. St. Petersburg; 2020. <https://elibrary.ru/koldtw> (in Russian)
25. Sorokovikova E.G. Blue-green threat. *Science Firsthand*. 2010; 6 (36). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sine-zelenaya-ugroza> (accessed: 26.01.2026).
26. Skulberg O.M. *Taxonomy of Toxic Cyanophyceae (Cyanobacteria). Algal Toxins in Seafood and Drinking Water*. London: Academic Press; 1993: 145–64.
27. Gupta K., Soni N., Nema R.K., Sahu N., Srivastava R.K., Ratte P., et al. Microcystin-LR in drinking water: An emerging role of mitochondrial-induced epigenetic modifications and possible mitigation strategies. *Toxicol. Rep.* 2024; 13: 101745. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101745>
28. Voloshko L.N., Plyushch A.V., Titova N.N. Toxins of cyanobacteria (CYANOBACTERIA, CYANOPHYTAS). *Al'gologiya*. 2008; 18(1): 3–20. (in Russian)
29. Chorus I., Welker M., eds. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. Boca Raton: CRC Press, WHO; 2021. Available at: <https://who.int/publications/m/item/toxic-cyanobacteria-in-water---second-edition>
30. WHO. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda; 2022. Available at: <https://who.int/publications/i/item/9789240045064>
31. Yamada Y., Kuzuyama T., Komatsu M., Shin-ya K., Omura S., Cane D.E., et al. Terpene synthases are widely distributed in bacteria. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. 2015; 112(3): 857–62. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422108112>
32. Kuz' N.V. Information technology analysis and content evaluation of geosmin in the water. *Informatsionnye i telekommunikatsionnye tekhnologii*. 2018; (39): 50–61. <https://elibrary.ru/ypeflv> (in Russian)
33. Shushkevich E.V., Karpushenko A.V., Polyani V.O., Stolyarova E.A. Water treatment and water quality management in conditions of phytoplankton development on the example of the Moskovetsky water source. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2010; (10–1): 13–5. <https://elibrary.ru/mvrern> (in Russian)
34. Shushkevich E.V., Babaev A.V., Smirnov A.V., Sourayeva N.O., Grigoryev A.S. Improving the water treatment technology at the west water treatment plant. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2011; (10): 7–11. <https://elibrary.ru/oilqly> (in Russian)

35. Turbinsky V.V., Bragina I.V., Kuz N.V., Sinitsyna O.O., Pushkareva M.V. The problem of algal bloom in the source of drinking water supply for the population. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2024; 103(12): 1466–72. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-12-1466-1472> <https://elibrary.ru/fwwkpd> (in Russian)
36. Kuz N.V., Turbinskii V.V., Sinitsyna O.O. Toxic “bloom” of the Don River, the water source of Rostov-on-Don. In: *Erisman Readings – 2023. New Developments in Preventive Medicine and Ensuring the Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population: Proceedings of the First All-Russian Scientific Congress with International Participation [Erismanovskie chteniya – 2023. Novoe v profilakticheskoi meditsine i obespechenii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya: Materialy I Vserossiiskogo nauchnogo kongressa s mezhdunarodnym uchastiem]*. Mytishchi; 2023: 144–6. <https://elibrary.ru/aahkfr> (in Russian)
37. Kuz N.V. Dynamics of cyanotoxin contamination of the Moscow River water. In: *Proceedings of the XIV International Symposium “Human Ecology and Medical and Biological Safety of the Population” [Sbornik materialov XIV mezhdunarodnogo simpoziuma “Ekologiya cheloveka i mediko-biologicheskaya bezopasnost’ naseleniya”]*. Krym; 2024: 137–40. (in Russian)
38. Svirčev Z., Lalić D., Bojadžija Savić G., Tokodi N., Drobac Backović D., Chen L., et al. Global geographical and historical overview of cyanotoxin distribution and cyanobacterial poisonings. *Arch. Toxicol.* 2019; 93(9): 2429–81. <https://doi.org/10.1007/s00204-019-02524-4>
39. 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)
40. Spoof L., Vesterkvist P., Lindholm T., Meriluoto J. Screening for cyanobacterial hepatotoxins, microcystins and nodularin in environmental water samples by reversed-phase liquid chromatography-electrospray ionisation mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*. 2003; 1020(1):105–19. [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(03\)00428-x](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(03)00428-x)
41. Welten R.D., Meneely J.P., Elliott C.T. A comparative review of the effect of microcystin-LR on the proteome. *Expo Health*. 2020; 12: 111–23. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00303-1>
42. Ding W., Shangguan Y., Zhu Y., Sultan Y., Feng Y., Zhang B., et al. Negative impacts of microcystin-LR and glyphosate on zebrafish intestine: Linked with gut microbiota and microRNAs? *Environ. Pollut.* 2021; 286: 117685. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117685>
43. 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 (Basel)*. 2015; 7(2): 457–77. <https://doi.org/10.3390/toxins7020457>
44. Sinitsyna O.O., Turbinskii V.V., Pushkareva M.V., Kuz N.V., Masaltsev G.V., Shiryayeva M.A., et al. Morphofunctional changes in the animal organisms under oral exposure to anatoxin-a in subchronic experimental settings. *Toksikologicheskii vestnik*. 2024; 32(6): 336–47. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-6-336-347> <https://elibrary.ru/jltlsi> (in Russian)
45. Pichardo S., Camean A.M., Jos A. *In vitro* toxicological assessment of cylindrospermopsin: a review. *Toxins (Basel)*. 2017; 9(12): 402. <https://doi.org/10.3390/toxins9120402>
46. Drinking Water Health Advisory for the Cyanobacterial Toxin Cylindrospermopsin Prepared by: U.S. Environmental Protection Agency Office of Water (4304T) Health and Ecological Criteria Division Washington, DC 20460. EPA Document Number: 820R15101; 2015.
47. Koksharova O.A., Safronova N.A. Non-proteinogenic amino acid β-N-methylamino-L-alanine (BMAA): bioactivity and ecological significance. *Toxins*. 2022; 14(8): 539. <https://doi.org/10.3390/toxins14080539>
48. Sidelev S.I., Babanazarova O.V. Detection of cyanobacterial toxins in water supply sources and tap water in some Russian cities: searching producers and testing removal methods. *Water Resources*. 2020; 47(2): 304–14. <https://doi.org/10.1134/S0097807820020189> <https://elibrary.ru/bxlumh>
49. Kuz N.V., Sinitsyna O.O. The problem of the “flowering” of the water sources. Evaluation of the influence of water processing on the content of cyanobacterium in drinking water of economic drinking water supply of Moscow. *Zdorov’e naseleniya i sreda obitaniya – ZNiSO*. 2017; (9): 38–42. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2017-294-9-38-42> <https://elibrary.ru/zjubep> (in Russian)

Сведения об авторах

Синицына Оксана Олеговна, доктор мед. наук, проф., член-корр. РАН, зам. директора по научной работе ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: Sinitsyna.oo@fncg.ru

Кузь Надежда Валентиновна, канд. мед. наук, зав. отделом коммунальной гигиены ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Москве» Роспотребнадзора, 129626, Москва, Россия. E-mail: nadezhda.v.k@gmail.com

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

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

Ширяева Маргарита Александровна, мл. науч. сотр. отд. гигиены воды ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: shiryayeva.ma@fncg.ru

About the authors

Oxana O. Sinitsyna, DSc (Medicine), professor, corresponding member of the RAS, deputy director for Research, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0241-0690> E-mail: sinitsyna.oo@fncg.ru

Nadezhda V. Kuz, PhD (Medicine), Head, Municipal Hygiene Department, Center for Hygiene and Epidemiology in Moscow, Moscow, 129626, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7573-0185> E-mail: nadezhda.v.k@gmail.com

Maria V. Pushkareva, DSc (Medicine), professor, chief researcher, Department of water hygiene, 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

Viktor V. Turbinsky, DSc (Medicine), associate professor, head of the Department of water hygiene, 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

Margarita A. Shiryayeva, junior researcher, Department of water hygiene, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203> E-mail: shiryayeva.ma@fncg.ru