



БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ


BIOLOGICAL RESOURCES

DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-4-544-555
EDN: RVSPPG
УДК 628.167+628.113

Научная статья / Research article

Влияние фитопланктона на качество воды поверхностных водных источников и питьевой воды

Е.В. Калинина  , Л.В. Рудакова 

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация
 Kalininaelenal@rambler.ru*

Аннотация. Рассмотрена проблема появления запахов в питьевой воде, связанная с развитием водорослей и цианобактерий в водоемах – источниках питьевой воды. Представлены результаты анализа информации об основных видах организмов, являющихся источниками одорантов в питьевой воде, продуцируемых ими химических веществ и описание запахов. Чаще всего причинами появления запахов в питьевой воде является массовое развитие *Aphanizomenon flos-aquae* и *Oscillatoria agardhii*, являющихся продуцентами геосмина и 2-метилизоборнеола. Приведены классификация уровней опасности по загрязнению воды цианобактериями и рекомендуемые при этом мероприятия, в том числе частота мониторинга и отбора проб. Представлены мероприятия, реализуемые при снижении численности цианобактерий в водоемах – источниках питьевого водоснабжения физическими, химическими и биологическими методами. Описаны методы удаления внутриклеточных и внеклеточных цианотоксинов из питьевой воды. Приводится анализ эффективности удаления различных веществ, обладающих одорирующим эффектом из питьевой воды.

Ключевые слова: питьевая вода, одоранты, геосмин, 2-метилизоборнеол фитопланктон, цианобактерии

© Калинина Е.В., Рудакова Л.В., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Благодарности и финансирование. Исследование выполнено в рамках научного проекта № FSNM-2020-0024 «Разработка научных основ экологически чистых и природоподобных технологий и рационального природопользования в области добычи и переработки углеводородного сырья» по заказу Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Вклад авторов: *Е.В. Калинина* – анализ литературных источников и подготовка текста статьи; *Л.В. Рудакова* – руководство направлением и критический анализ текста статьи.

История статьи: поступила в редакцию 15.01.2023; доработана после рецензирования 30.04.2023; принята к публикации 15.09.2023.

Для цитирования: *Калинина Е.В., Рудакова Л.В.* Влияние фитопланктона на качество воды поверхностных водных источников и питьевой воды // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 4. С. 544–555. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-4-544-555>

Influence of phytoplankton on the water quality of surface water sources and drinking water

Elena V. Kalinina^{ID}✉, Larisa V. Rudakova^{ID}

*Research Center of Ministry of Defence of the Russian Federation,
Sevastopol, Russian Federation*
✉Kalininaelena1@rambler.ru

Abstract. The problem of the appearance of odors in drinking water associated with the development of algae and cyanobacteria in reservoirs of drinking water sources is considered. The results of the analysis of information on the main types of organisms that are sources of odorants in drinking water, chemicals produced by them and a description of odors are presented. Most often, the causes of odors in drinking water are the massive development of *Aphanizomenon flos-aquae* and *Oscillatoria agardhii*, which are producers of geosmin and 2-methylisoborneol. The classification of hazard levels for water pollution by cyanobacteria and recommended measures, including the frequency of monitoring and sampling, are given. The measures implemented with a decrease in the number of cyanobacteria in reservoirs of drinking water supply sources by physical, chemical and biological methods are presented. Methods of removal of intracellular and extracellular cyanotoxins from drinking water are described. The analysis of the efficiency of removal of various substances with odorizing effect from drinking water is presented.

Keywords: drinking water, odorants, geosmin, 2-methylisoborneol phytoplankton, cyanobacteria

Acknowledgements and Funding. The research was carried out within the framework of the scientific project No. FSNM-2020-0024 “Development of scientific foundations of environmentally friendly and nature-like technologies and rational use of natural resources in the field of extraction and processing of hydrocarbon raw materials” commissioned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Authors’ contributions: *E.V. Kalinina* – literature analysis and the article text preparation; *L.V. Rudakova* – direction guidance and the article text critical analysis.

Article history: received 15.01.2023; revised 30.04.2023; accepted 15.09.2023.

For citation: Kalinina EV, Rudakova LV. Influence of phytoplankton on the water quality of surface water sources and drinking water. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2023;31(4):544–555. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-4-544-555>

Введение

Более 40 % мирового населения сталкиваются с проблемой нехватки воды. Обеспечение питьевой водой нормативного качества является одной из целей устойчивого развития. Даже в регионах, количественно обеспеченных водой, возникают проблемы с ее качеством.

Качество питьевой воды обусловлено качеством воды в водных объектах – источниках питьевого водоснабжения и зависит от природных и антропогенных факторов, влияющих на содержание минеральных и органических примесей природного и антропогенного происхождения [1].

Проблемы возникновения запахов в питьевой воде зафиксированы в мире и Российской Федерации: Москва, Ижевск, Екатеринбург, Качканар, Новокузнецк, Хабаровск, Пермь. Особенностью возникновения неприятных запахов в воде является их эпизодичность, связанная с периодами массового развития цианобактерий [2]. Развитие некоторых видов диатомовых, сине-зеленых, зеленых и жгутиковых водорослей является причиной ухудшения органолептических свойств питьевой воды. Применение традиционной технологической схемы водоподготовки (коагуляция – осаждение – фильтрация – обеззараживание) не позволяет полностью удалить одоранты из питьевой воды.

Анализ предметной области

Наиболее часто в питьевой воде проявляются запахи земли и плесени, характерные для таких веществ в воде, как геосмин и 2-метилизоборнеол (МИБ), являющихся продуктами жизнедеятельности актиномицетов, цианобактерий и многих видов водорослей [1; 3]. Общее количество видов, являющихся источниками одорантов, неизвестно. В природных водах геосмин и 2-метилизоборнеол могут встречаться совместно и по отдельности.

Запахи могут проявляться в водоисточнике, появляться в процессе водоподготовки и водораспределения. Известно, что при лабораторном культивировании цианобактерий одоранты выделяются на всех этапах роста культуры, но в природных водоемах интенсивность «цветения» водоема не всегда связана с интенсивностью проявления одорантов [2]. Наиболее часто запах в питьевой воде появляется весной и в конце лета – начале осени [3; 4].

В нормальных условиях роста цианобактерий количество одорантов, выделяемых ими незначительно, не представляет проблемы. При воздействии на них стрессовых факторов (отклонение от оптимальных степени освещенности, температуры, рН среды, скорости течения, содержания биогенных элементов и др.) количество продуцируемых одорантов повышается [3; 5]

в результате их естественной гибели и их разрушения гетеротрофными организмами (грибами, актиномицетами и мелкими ракообразными).

В современных условиях в связи с глобальными изменениями климата Земли можно ожидать повышения степени распространения цианобактерий в водных объектах ввиду:

- повышения температуры воды в водных объектах, расширения ареала обитания цианобактерий;
- увеличения содержания биогенных веществ в водных объектах;
- повышения частоты засух, приводящих к понижению уровня воды в водоемах, увеличению степени освещенности придонных слоев, формированию благоприятных для цианобактерий условий.

Наблюдения за развитием фитопланктона Волчихинского водохранилища (Свердловская область) позволили установить [4], что запах в воде появляется при резкой смене доминирующих видов *Aphanizomenon flos-aquae* и *Oscillatoria agardhii*. *Aphanizomenon flos-aquae* и *Oscillatoria agardhii* являются продуцентами геосмина, а *Oscillatoria agardhii* еще и МИБ. Совместное присутствие данных видов, даже при доминировании одного из них, не приводило к появлению запахов.

Запах воды из Ижевского пруда характеризовался как запах «дуста». При идентификации состава фитопланктона выделено более 250 видов и внутривидовых таксонов. Зеленые водоросли были представлены в основном родом *Scenedesmus*, *Pediastrum*, *Oocystis*, *Tetraedron*, *Monoraphidium*. Из диатомовых водорослей присутствовали представители родов *Aulacoseira*, *Asterionella*, *Diatoma*, *Stephanodiscus*, *Navicula*, *Fragilaria*, *Synedra*, *Nitzschia*. Виды сине-зеленых водорослей были представлены преимущественно *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis pulvereae*, *Merismopedia tenuissima*, *Oscillatoria agardhii*, *Anabaena flos-aquae*, *Woronichinia compacta*, *Woronichinia naegeliana*. Наблюдениями было установлено, что «цветение» воды совпадает с массовым развитием *Aphanizomenon flos-aquae* [4; 5], при этом в воде содержался геосмин. Отмечалось появление запаха в воде Ижевского пруда, совпадающее с массовым развитием вида *Oscillatoria agardhii*, ставшим в последующем доминирующим.

Анализ научно-технической информации [2–6] позволил выявить основные виды планктонных организмов, являющихся источником одорантов, приоритетные химические вещества, продуцируемые ими, и характер запахов (табл. 1).

Проблема снижения содержания одорантов в питьевой воде должна решаться комплексно и включать решение следующих задач [5]:

- 1) мониторинг количества цианобактерий и содержания цианотоксинов в водоисточнике;
- 2) снижение количества цианобактерий, содержания одорантов и цианотоксинов в водоисточнике;
- 3) удаление одорантов и цианотоксинов из питьевой воды.

Таблица 1. Одоранты, продуцируемые водорослями и цианобактериями [6]

№	Химическое вещество	Характер запаха	ПКЗ*, мг/дм ³	Виды – источники одоранта
1.	Диметилсульфид C ₂ H ₆ S	Капусты, сероводорода	0,1	<i>Asterionella formosa</i> ; <i>Nitzschia actinastroides</i> ; <i>Diatoma elongate</i> ; <i>Ochromonas danica</i> ; <i>Ochromonas malhamensis</i> ; <i>Chlamydomonas globose</i> – 1 <i>Anacystis nidulans</i> ; <i>Synechococcus cedrorum</i> ; <i>Oscillatoria chalybea</i> ; <i>Oscillatoria tenuis</i> ; <i>Phormidium autumnale</i> ; <i>Plectonema boryanum</i> – 2
2.	Диметил-дисульфид C ₂ H ₆ S ₂	Септика, чеснока, гнили	< 0,4	<i>Microcystis aeruginosa</i> ; <i>Microcystis wesenbergii</i> – 2
3.	Диметил-трисульфид C ₂ H ₆ S ₃	Септика, чеснока, гнили, болота	0,001	<i>Microcystis aeruginosa</i> ; <i>Microcystis wesenbergii</i> – 2
4.	Изопропил-дисульфид [(CH ₃) ₂ CH] ₂ S ₂	Лука, мяса, сероводорода	-	<i>Microcystis flos-aquae</i> – 2
5.	6-метил-5-гептен-2-он (CH ₃) ₂ C=CHCH ₂ CH ₂ COCH ₃	Капусты, фруктов, эфира	5,04	<i>Aulacoseira granulata</i> ; <i>Cyanidium caldarium</i> ; <i>Scenedesmus subspicatus</i> ; <i>Syncrypta sp.</i> ; <i>Synura sp.</i> – 1 <i>Anabaena cylindrica</i> ; <i>Microcystis aeruginosa</i> ; <i>Synechococcus sp.</i> – 2
6.	2,6,6-триметил-1-циклогексен-1-карбокисальдегид или β-циклоцитраль C ₁₀ H ₁₆ O	Табачного дыма, плесени	1,93	<i>Scenedesmus subspicatus</i> ; <i>Dinobryon cylindricum</i> ; <i>Uroglena sp.</i> ; <i>Ulothrix fimbriata</i> – 1 <i>Microcystis aeruginosa</i> ; <i>Microcystis flos-aquae</i> ; <i>Microcystis botrys</i> ; <i>Microcystis viridis</i> ; <i>Microcystis wesenbergii</i> – 2
7.	Экзо-1,2,7,7-тетраметилбицикло [2.2.1] гертан-2-ол или 2-метил-изоборнеол C ₁₁ H ₂₀ O	Земли, затхлый, камфоры	0,0015	<i>Hyella sp.</i> ; <i>Jaaginema geminatum</i> (syn. <i>Oscillatoria geminate</i>); <i>Leibleinia aestuarii</i> ; <i>Oscillatoria curviceps</i> ; <i>Oscillatoria limosa</i> ; <i>Oscillatoria tenuis</i> ; <i>Oscillatoria variabilis</i> ; <i>Phormidium breve</i> (syn. <i>Oscillatoria brevis</i>); <i>Phormidium favosum</i> ; <i>Phormidium tenue</i> (syn. <i>Oscillatoria tenuis</i>); <i>Phormidium LM689</i> , <i>Phormidium sp.</i> ; <i>Planktothrix agardhii</i> (syn. <i>Oscillatoria agardhii</i>); <i>Planktothrix cryptovaginata</i> (syn. <i>Lyngbya cryptovaginata</i>); <i>Planktothrix perornata f. attenuate</i> ; <i>Porphyrosiphon martensianus</i> (syn. <i>Lyngbya martensiana</i>), <i>Pseudanabaena articulate</i> ; <i>Pseudanabaena catenata</i> ; <i>Pseudanabaena limnetica</i> (syn. <i>Oscillatoria lillinetica</i>); <i>Tychonema granulatum</i> (syn. <i>Oscillatoria f. granulata</i>) – 2
8.	Геосмин C ₁₂ H ₂₂ O	Земли, затхлый	0,0004	<i>Anabaena circinalis</i> ; <i>Anabaena crassa</i> , <i>Anabaena lemmermannii</i> ; <i>Anabaena macrospora</i> ; <i>Anabaena planctonica</i> ; <i>Anabaena solitaria</i> ; <i>Anabaena viguieri</i> ; <i>Anabaena millerii</i> ; <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> ; <i>Aphanizomenon gracile</i> , <i>Geitlerinema splendidum</i> (syn. <i>Oscillatoria splendida</i>); <i>Leibleinia subtilis</i> (syn. <i>Lyngbya subtilis</i>); cf. <i>Microcoleus sp.</i> ; <i>Phormidium allorgei</i> (syn. <i>Lyngbya allorgei</i>); <i>Phormidium amoenum</i> (syn. <i>Oscillatoria amoena</i>); <i>Phormidium breve</i> (syn. <i>Oscillatoria brevis</i>); <i>Phormidium cortianum</i> (syn. <i>Oscillatoria cortiana</i>); <i>Phormidium formosum</i> (syn. <i>Oscillatoria formosa</i>); <i>Phormidium simplicissimum</i> (syn. <i>Oscillatoria simplicissima</i>); <i>Phormidium uncinatum</i> ; <i>Phormidium viscosum</i> ; <i>Phormidium sp.</i> ; <i>Planktothrix agardhii</i> (syn. <i>Oscillatoria agardhii</i>); <i>Planktothrix prolifica</i> (syn. <i>Oscillatoria prolifica</i>); <i>Pseudanabaena catenata</i> ; <i>Schizothrix muelleri</i> ; <i>Symploca muscorum</i> ; <i>Tychonema bornetii</i> (syn. <i>Oscillatoria bornetii</i>); <i>Tychonema granulatum</i> (syn. <i>Oscillatoria f. granulata</i>) – 2

Окончание табл. 1

№	Химическое вещество	Характер запаха	ПКЗ*, мг/дм ³	Виды – источники одоранта
9.	4-(2,6,6-триметил-1-циклогексенил)-3-бетен-2-он или β-ионон C ₁₃ H ₂₀ O	Фиалки, фруктов	0,0007	<i>Cyanidium caldarium</i> ; <i>Scenedesmus subspicatus</i> ; <i>Synura sp.</i> – 1 <i>Anabaena cylindrica</i> ; <i>Aphanizomenon gracile</i> ; <i>Synechococcus 6911</i> – 2
10.	1,2-дигидро-1,1,6-триметилнафталин C ₁₃ H ₁₆	Солодки	–	<i>Cyanidium caldarium</i> – 1
11.	Транс-3,7-диметил-2,6-октадиен-1-ол C ₁₀ H ₁₈ O	Сладковатый, цветов, фруктов, роз, воска, цитрусов	7,71	<i>Synechococcus 6911</i> – 2
12.	Геранилацетон C ₁₃ H ₂₂ O	Свежести, зелени, фруктов, воска, роз, деревьев, магнолии	0	<i>Cyanidium caldarium</i> ; <i>Scenedesmus subspicatus</i> – 1
13.	Цис-3,7-диметил-2,6-октадиен-1-ол, нерол C ₁₀ H ₁₈ O	Сладковатый, цитрусов, магнолии	29,3	<i>Synechococcus 6911</i> – 2
14.	(Е,Е)2,4-декадиеналь C ₁₀ H ₁₆ O	Прогорклый / рыбный	1,98	<i>Dinobryon divergens</i> ; <i>Dinobryon cylindricum</i> ; <i>Mallomonas papillosa</i> ; <i>Synura petersenii</i> ; cf. <i>Syncrypta sp.</i> ; <i>Uroglena americana</i> ; <i>Uroglena sp.</i> ; <i>Fragilaria sp.</i> ; <i>Cryptomonas rostratiformis</i> ; <i>Peridinium willei</i> – 1
15.	2,4,7-декатриеналь C ₁₀ H ₁₄ O	Прогорклый / рыбы	1,95	<i>Dinobryon divergens</i> ; <i>Dinobryon cylindricum</i> ; <i>Synura petersenii</i> ; <i>Uroglena americana</i> ; <i>Uroglena sp.</i> (UTCC276) – 1 <i>Microcystis papillosa</i> ; <i>Microcystis varians</i> – 2
16.	Эктокарпен C ₁₁ H ₁₆	Зелени томатов	–	<i>Amphora veneta</i> ; <i>Gomphonema parvulum</i> ; <i>Phaeodactylum tricornutum</i> ; <i>Skeletonema costatum</i> ; <i>Lithodesmium undulatum</i> ; <i>Ectocarpus spp.</i> – 1

ПКЗ* – Пороговая концентрация запаха; 1 – эукариотические водоросли; 2 – цианобактерии.

В большинстве стран не установлены требования по обязательности контроля за численностью цианобактерий и содержанием цианотоксинов в источниках питьевого водоснабжения. Глобальной коалицией центров по изучению водных ресурсов (Global water research coalition) на основании существующего опыта разработаны принципы мониторинга численности цианобактерий в водных объектах [7]: визуальная оценка состояния водисточника, отбор проб воды для изучения видового состава цианобактерий и определения их численности, определение содержания цианотоксинов.

Для оценки опасности загрязнения водисточника цианобактериями [8; 9] выделены уровни опасности и предложены программы их мониторинга (табл. 2).

Косвенными методами определения уровня загрязнения воды цианобактериями являются определение концентрации хлорофилла α в воде [9] и определение вегетационного индекса [10]. Указанные методы реализуются в том числе дистанционно. В странах Европейского Союза концентрации хлорофилла α является регулярно контролируемым параметром в рамках реализации Водной рамочной директивы.

Таблица 2. Уровни опасности по загрязнению воды цианобактериями [8; 9]

Опасность	Характеристика уровня	Рекомендации
Низкая	500–2000 клеток цианобактерий в 1 мл воды	Регулярный мониторинг, идентификация доминирующего вида. Отбор проб воды 1 раз в неделю, определение количества клеток цианобактерий. Визуальное обследование водоема для выявления признаков его «цветения»
Средняя	2000–6500 клеток цианобактерий в 1 мл воды	Отбор проб воды 2 раза в неделю. Оценка роста популяции и видового разнообразия. Оценка необходимости контроля токсичности воды и мониторинга содержания токсинов
Высокая	Более 6500 клеток цианобактерий в 1 мл воды	Оценка возможного риска для здоровья человека по данным мониторинга содержания токсинов. Разработка рекомендаций для потребителей, использующих воду, не прошедшую водоподготовку. Отбор проб воды ежедневно. Мониторинг содержания цианотоксинов в питьевой воде
Очень высокая	Более 65 000 клеток цианобактерий в 1 мл воды	Информирование надзорных органов. Рекомендации для потребителей, использующих воду, не прошедшую водоподготовку. Оценка токсичности или содержания цианотоксинов в источнике водоснабжения и в питьевой воде. Мониторинг водоема. При высокой степени опасности для здоровья населения использование альтернативных источников питьевого водоснабжения

Снижение численности цианобактерий в водоемах

В настоящее время для снижения численности цианобактерий в водоемах¹ [5; 7; 10–15] предложено применять физические, химические и биологические методы (табл. 3).

Таблица 3. Методы снижения численности цианобактерий в водоемах

Метод	Мероприятия
Физический	Искусственная дестратификация, аэрация, перемешивание. Очистка дна для удаления бентосных водорослей и питательных веществ. Обработка ультразвуком для замедления роста цианобактерий и их гибели
Химический	Контроль содержания питательных веществ: гипополимническая оксигенация, осаждение и «кэпирование» фосфора. Контроль численности цианобактерий: применение коагулянтов и веществ с альгигцидным и альгистатическим действием
Биологический	Применение вирусов и инфекционных бактерий. Регулирование трофической структуры водной экосистемы с преобладанием численности гетеротрофов, питающихся цианобактериями или конкурирующих с ними за питание

Устранение цианобактерий и цианотоксинов из питьевой воды

Известны следующие способы снижения количества цианобактерий и цианотоксинов из питьевой воды, подаваемой потребителям:

- 1) использование альтернативных источников водоснабжения;
- 2) предотвращение попадания цианобактерий и/или цианотоксинов при заборе воды из источника водоснабжения, в том числе изменение уровня водозаборного оголовка;
- 3) очистка воды от цианобактерий и/или цианотоксинов.

Характеристика методов очистки воды от цианобактерий и продуцируемых ими цианотоксинов представлена в табл. 4.

¹ Состав для очистки водоемов от цианобактерий и зеленых водорослей: пат. 2742169 Рос. Федерация: МПК C02F 1/24, C02F 1/50, C02F 1/72, C02F 1/28, C02F 9/04, C02F 9/14, C02F 103/04 / Зарев В.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Листерра». N 2020118683/20; заявл. 05.06.2020; опубл. 02.02.2021 Бюл. № 4.

На первом этапе очистки воды рекомендуется удалять цианобактерии вместе с содержащимися в них цианотоксинами и одорантами методами предварительного окисления, коагуляции, седиментации, фильтрации и флотации. В процессе водоподготовки целесообразно применять микро-, ультрафильтрацию металлическими или тканевыми фильтрами с разным размером пор. Известно применение мембран, в том числе из полимерных биоразлагаемых материалов [19]. Извлечение из воды клеток цианобактерий седиментацией и флотацией позволяет предотвратить их разрушение и поступление одорантов в воду. При седиментации извлекается до 80 % цианобактерий, при флотации – до 98 % [21]. На эффективность применения коагулянтов и флокулянтов влияют вид цианобактерий. Исследованиями [21] показаны преимущества полимерных коагулянтов в сравнении с солями металлов: более высокая эффективность, легкое отделение образующегося осадка, возможность применения в более широком диапазоне pH среды и температур [19].

Таблица 4. Характеристика методов очистки воды от цианобактерий и цианотоксинов [1; 5; 7; 15–24]

Метод	Эффективность применения
<i>Удаление внутриклеточных цианотоксинов (интактные клетки)</i>	
Предварительное окисление	Может привести к лизису клеток и последующему выбросу цианотоксинов в воду. В случае применения окисления для очистки от других загрязнений необходимо использовать низкие дозы окислителей, не вызывающие лизис клеток (перманганат калия). При использовании высоких доз они должны быть достаточными для разрушения токсинов
Коагуляция, седиментация, фильтрация	Применяют для удаления внутриклеточных токсинов в случаях, когда клетки способны агрегироваться в легко отделяемый осадок
Отделение на мембранах	Мало данных. Предположительно эффективно для удаления внутриклеточных токсинов. Микрофильтрация и ультрафильтрация не эффективны, если клетки аккумулируются на мембране
Флотация	Эффективна для удаления внутриклеточных цианотоксинов
<i>Удаление внеклеточных цианотоксинов (растворенных)</i>	
Отделение на мембранах	Зависит от материала, размера пор мембраны и качества воды. Нанофильтрация эффективна для удаления внеклеточных микроцистинов. Для удаления внеклеточного микроцистина и цилиндроспермопсина используют обратный осмос
Окисление перманганатом калия	Эффективен для окисления микроцистинов и анатоксинов
Озонирование	Эффективен для окисления внеклеточного микроцистина, анатоксина-α и цилиндроспермопсина
Хлорамины	Не эффективны
Хлорирование	Эффективен для окисления внеклеточных цианотоксинов при pH=8 и ниже. Не эффективен для анатоксина-α
УФ-облучение	В высоких дозах эффективно для разрушения микроцистина и цилиндроспермопсина
Сорбция активированными углями	Эффективность порошкообразного активированного угля зависит от типа и размера пор. Древесный активированный уголь эффективен для адсорбции микроцистинов (в дозах более 20 мг/дм ³), не эффективен для удаления сакситоксинов, вкуса и запаха. Гранулированный активированный уголь эффективен для удаления микроцистинов, менее эффективен для удаления анатоксина-α и цилиндроспермопсина

Для снижения интенсивности запахов в питьевой воде недостаточно удалить только клетки цианобактерий, необходимо очистить ее от цианотоксикантов. Применение для этих целей сорбентов, в частности активированных углей, является наиболее эффективным и технически доступным методом.

Порошкообразные активированные угли (ПАУ) применяют совместно с коагулянтами или после очистки ими. Показана эффективность их введения в виде суспензии с дозой 1–7 мг/дм³ в воду в начало технологического процесса с последующим удалением в процессе очистки. Преимуществом ПАУ является возможность его кратковременного использования, недостатком – невозможность его повторного использования.

Гранулированный активированный уголь (ГАУ) целесообразно применять на заключительных этапах водоочистки. Преимуществом ГАУ является большая адсорбирующая поверхность, позволяющая использовать его для извлечения из воды широкого спектра органических веществ. В качестве недостатка ГАУ можно отметить необходимость его регенерации и замены.

Высокая эффективность удаления из воды цианотоксинов достигается при использовании электроактивных полимеров [22]. Например, наночастицы оксида железа (II, III) в пленке полипиррола эффективно извлекают из воды микроцистис и цилиндропермопсин. К преимуществам электроактивных полимеров в сравнении с традиционными сорбентами относятся более высокая сорбционная емкость (238–300 мкг/мг), малое время контакта (8–15 минут), увеличенное количество циклов использования.

Реагентное окисление, озонирование и обработка воды ультрафиолетом [5; 7; 23] могут сопровождаться образованием токсичных побочных продуктов, например тригалометанов. Исследования в области окисления цианотоксинов позволили определить эффективность метода, объединяющего электролиз и гетерогенный фотокатализ. Применение метода электролиза позволяет снизить концентрацию микроцистинов на 49 %, применение фотокатализа – на 41 %, а их совместное применение – на 99 % [24].

Несмотря на эффективность применения озонирования, его распространение ограничивается высокой стоимостью реализации. Снижение затрат на озонирование достигается при использовании микропузырьков озона, генерируемых низкотемпературным плазменным реактором на основе диэлектрического барьерного разряда со встроенным жидкостным осциллятором [5; 25].

Эффективность использования методов устранения одорантов различного происхождения из воды [6] представлена в табл. 5.

Использование O₃ в дозах 1–15 мгO₃/дм³ или H₂O₂ с концентрацией 1–15 мг/дм³ приводит к снижению суммарного содержания одорантов (геосмин и МИБ) до 50 % и снижению интенсивности запаха с 4 до 3 баллов. Совместное применение O₃ и H₂O₂ показало большую эффективность [3]. В целом применение окислительных агентов для дезодорации воды менее эффективно, чем применение ПАУ. Финишная хлораммонизация практически не влияет на уровень запаха питьевой воды. Вторичное хлорирование очищенной воды без аммонизации может привести к появлению хлорного запаха.

Таблица 5. Методы устранения одорантов из воды

№	Одорант	Эффективно	Не эффективно
1.	Геосмин	O ₃ , УФ/Н ₂ O ₂ , O ₃ / Н ₂ O ₂ , активированный уголь, биологический метод	Cl ₂ , ClO ₂ , KMnO ₄ , хлорамины, аэрация
2.	2-метилизоборнеол	O ₃ , УФ/Н ₂ O ₂ , O ₃ / Н ₂ O ₂ , активированный уголь, биологический метод	Cl ₂ , ClO ₂ , KMnO ₄ , хлорамины, аэрация
3.	Диметилдисульфид, Диметилтрисульфид	Окисление, активированный уголь, биологический метод	Хлорамины
4.	Хлорированные соединения	Активированный уголь	Биологический
5.	Сероводород	Аэрация, окисление	–
6.	Низкомолекулярные ароматические и алифатические соединения	Аэрация, активированный уголь	Окисление
7.	Фенол, хлорфенолы	O ₃ , ClO ₂ , активированный уголь, биологический метод	Cl ₂ , хлорамины, KMnO ₄
8.	Бентосное цианобактериальное цветение	Оптимизация уровня воды в водоемах	–

Заключение

1. Повышенная антропогенная нагрузка, сопровождающаяся поступлением биогенных элементов со сточными водами, и изменение климата Земли, способствующее увеличению содержания цианобактерий за счет расширения ареала их обитания, приводит к повышению частоты возникновения случаев появления запахов в питьевой воде.

2. Наиболее часто причиной возникновения запахов в питьевой воде является развитие в воде водоисточника *Aphanizomenon flos-aquae*; *Oscillatoria agardhii*; *Microcystis flos-aqua*; *Microcystis viridis*.

3. Для контроля численности цианобактерий в источниках питьевого водоснабжения необходимо проводить мониторинг, в том числе методами дистанционного зондирования.

4. Для удаления большинства видов одорантов, продуцируемых цианобактериями, целесообразно сочетание методов озонирования и сорбции.

5. Порошкообразные активированные угли целесообразно вводить в начале технологического процесса очистки. Гранулированные активированные угли обычно используют на заключительных стадиях.

Список литературы

- [1] Пономарев Д.С. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для управления технологическим процессом дезодорации природных поверхностных вод на городских очистных сооружениях: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2019. 162 с.
- [2] Бутакова Е.А. Особенности одорирующих веществ (геосмина и 2-метилизоборнеола) как вторичных метаболитов цианобактерий // Физиология растений. 2013. Т. 60. № 4. С. 537–540.
- [3] Гусев Е.Е. Одорирующие вещества биологического происхождения в природных водах и способы их удаления при водоподготовке: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2007. 23 с.

- [4] Иванова Н.А., Шарипова Л.А. Состояние фитопланктона ижевского пруда в районе водозабора МУП города Ижевска «Ижводоканал» в 2002–2005 годах // Вестник Удмуртского университета. Биология. 2006. № 10. С. 17–24.
- [5] Калининкова Т.Б., Гайнутдинов М.Х., Шагидуллин Р.Р. Методы контроля численности цианобактерий в водоемах и очистки питьевой воды от цианотоксинов // Российский журнал прикладной экологии. 2019. № 4 (20). С. 33–45.
- [6] Lee J., Kumar Rai P., Jae Jeon Y., Kim K.-H., Kwon E.E. The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water // Environmental Pollution. 2017. № 227. P. 252–262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.058>
- [7] Hasan M.N. (ed.) International guidance manual for the management of toxic cyanobacteria. London, 2009. 93 p.
- [8] Newcombe G., House J., Ho L., Baker P., Burch M. Management strategies for cyanobacteria (blue-green algae) and their toxins: a guide for water utilities. WQRA // Research Report 74. 2010. 101 p.
- [9] Du Preez H.H., Van Baalen L. Generic incident management framework for toxic blue-green algal blooms, for application by potable water suppliers // WRS Report TT 263/06. Water Research Commission. Pretoria, 2006. 65 p.
- [10] Кутявина Т.И., Аишхмина Т.Я. Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 13–21.
- [11] Chow C.W.K., Drikas M., House J., Burch M.D., Velzeboer R.M.A. The impact of conventional water treatment processes on cells of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* // Water Research. 1999. Vol. 33. P. 3253–3262.
- [12] Состав для очистки водоемов от цианобактерий и зеленых водорослей: пат. 2742169 Рос. Федерация: МПК C02F 1/24, C02F 1/50, C02F 1/72, C02F 1/28, C02F 9/04, C02F 9/14, C02F 103/04 / Зарев В.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Листерра». N 2020118683/ 20; заявл. 05.06.2020; опубл. 02.02.2021 Бюл. № 4.
- [13] Barrett P.R.F., Curnow J.C., Littlejohn J.W. The control of diatom and cyanobacterial blooms in reservoirs using barley straw // Hydrobiologia. 1996. Vol. 340. P. 307–311.
- [14] Jelbart J. Effect of rotting barley straw on cyanobacteria: a laboratory investigation // Water. 1993. Vol. 20. P. 31–32.
- [15] Newman J.R., Barrett P.R.F. Control of *Microcystis aeruginosa* by decomposing barley straw // Journal of Aquatic Plant Management. 1983. Vol. 31. P. 203–206.
- [16] Everall N.C., Lees D.R. The use of barley straw to control general and blue-green algal growth in a Derbyshire reservoir // Water Research. 1996. Vol. 30. P. 269–276.
- [17] Ahn C.Y., Park M.H., Joung S.H., Kim H.S., Jang K.Y., Oh H.M. Growth inhibition of cyanobacteria by ultrasonic radiation: laboratory and enclosure studies // Environmental Science and Technology. 2003. Vol. 37. P. 3031–3037.
- [18] Zhang G.M., Zhang P.Y., Wang B., Liu H. Ultrasonic frequency effects on the removal of *Microcystis aeruginosa* // Ultrason. Sonochem. 2006. Vol. 13. P. 446–450.
- [19] Cyanobacteria and cyanotoxins: information for drinking water systems. United States Environmental Protection Agency, 2014. 11 p.
- [20] Hooman M., Sajjadi N., Marandi R., Zaeimdar M., Akbarzadeh N. Design of a novel PEBA/CDs polymeric fibrous composite nanostructure in order to remove navicula algal and improve the quality of drinking water // Polymer Bulletin. 2022. No. 79. P. 7459–7477. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03852-1>
- [21] Agrawal M., Yadav S., Patel C., Raipuria N., Agrawal M.K. Bioassay methods to identify the presence of cyanotoxins in drinking water supplies and their removal strategies // European Journal of Experimental Biology. 2012. Vol. 2. P. 321–336.

- [22] *Hena S., Rozi R., Tabassum S., Huda A.* Simultaneous removal of potent cyanotoxins from water using magnetophoretic nanoparticles of polypyrrole: adsorption kinetic and isotherm study // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 14868–14880.
- [23] *Pelegri R.T., Freire R.S., Duran N., Bertazzolli R.* Photoassisted electrochemical degradation of organic pollutants on a DSA type oxide electrode: process test for a phenol synthetic solution and its application for the E1 bleach Kraft mill effluent // *Environmental Science and Technology*. 2001. Vol. 35. P. 22849–2853.
- [24] *Garcia A.C.A., Rodriguez M.A.S., Xavier J.L.N., Gazulla V., Meneguzzi A., Bernardes A.M.* Degradation of cyanotoxins (microcystin) in drinking water using photoelectrooxidation // *Brazilian Journal of Biology*. 2015. Vol. 75, no. 2. P. 45–49.
- [25] *Pandhal J., Siswanto A., Kuvshinov D., Zimmerman W.B., Lawton L., Edwards C.* Cell lysis and detoxification of cyanotoxins using a novel combination of microbubble generation and plasma microreactor technology for ozonation // *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 9. 678. 11 p.

Сведения об авторах:

Калинина Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, д. 29. ORCID: 0000-0001-6965-4895, eLIBRARY SPIN-код: 9259-4503. E-mail: Kalininaelena1@rambler.ru

Рудакова Лариса Васильевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, д. 29. ORCID: 0000-0003-3292-8359, eLIBRARY SPIN-код: 1705-6430. E-mail: larisa.rudakova.007@gmail.com