

ПИТЬЕВОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО РАЗВИТИЯ СИНЕЗЕЛЕННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ

К.В. Беспалова^{1,2}, А.В. Селезнева¹, В.А. Селезнев^{1,2}

E-mail: seleznev53@mail.ru

¹ ФГБУН «Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Институт экологии Волжского бассейна РАН», г. Тольятти, Россия

² ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти, Россия

АННОТАЦИЯ: Выполнена оценка загрязнения поверхностного источника водоснабжения (Куйбышевского водохранилища) метаболитами цианобактерий (синезеленых водорослей) в условиях роста биогенной нагрузки. В период массового развития цианобактерий ухудшается качество воды в водохранилище по ряду показателей. Среди широкого спектра цианоксинов наибольшую опасность для населения представляет микроцистин-LR, концентрация которого в питьевой воде не должна превышать 1 мкг/дм³. Рост антропогенной нагрузки и глобальное потепление климата создают благоприятные условия для бурного развития цианобактерий, поэтому вопросы обеспечения населения качественной питьевой водой в перспективе будут обостряться.

Традиционные методы, применяемые на станциях водоподготовки питьевой воды в волжских городах, малоэффективны при удалении внутриклеточных и внеклеточных цианотоксинов. Наилучшим и безопасным барьером могут служить мембранные технологии, позволяющие проводить ультрафильтрацию бактериальных клеток без их механического повреждения и нанофильтрацию растворенных в воде цианотоксинов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водоснабжение, водохранилище, качество воды, цианобактерии, токсины, микроцистин-LR, мембранные технологии.

Обеспечение населения качественной питьевой водой является необходимым элементом создания комфортной и безопасной среды в рамках реализации национальных целей развития Российской Федерации до 2030 года [1]. На фоне глобального потепления климата в условиях роста антропогенной нагрузки на водные объекты проблема питьевого водоснабжения в ближайшей перспективе будет только обостряться.

В последние годы чрезмерное поступление соединений азота и фосфора в водохранилища от точечных и диффузных источников загрязнения активизирует массовое развитие цианобактерий (Cyanobacteria) или синезеленых водорослей (Cyanophyta) [2–4], что приводит к появлению в воде токсичных метаболитов – цианотоксинов [5–8]. Возникает риск попадания токсических веществ вместе с питьевой водой в организм человека. Всемирная организация здраво-

охранения установила, что наибольшую опасность среди цианотоксинов для здоровья и жизни людей представляет микроцистин-LR, для которого установлена ориентировочно допустимая концентрация в питьевой воде 1 мкг/дм³.

Крупные водохранилища Средней и Нижней Волги являются источниками питьевого водоснабжения многих волжских городов. Многолетние наблюдения на Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах показывают, что из-за массового развития цианобактерий («цветение» воды) нарушается гидрохимический и газовый режим водохранилищ, ухудшается качество воды по ряду показателей, включая привкус, запах и содержание органических и, возможно, токсических веществ [9, 10].

В условиях массового развития цианобактерий традиционные технологические линии очистки, используемые для приготовления питьевой воды в системах централизованного водоснабжения волжских городов, малоэффективны при удалении токсинов, а также привкуса и запаха [11]. Необходимо оценить реальную опасность токсического загрязнения волжских водохранилищ как поверхностных источников водоснабжения.

В рамках проведенного исследования определены масштабы и интенсивность массового развития цианобактерий на самом крупном в Волжско-Камском каскаде – Куйбышевском водохранилище, а также риски загрязнения поверхностного источника водоснабжения органическими и токсическими веществами, выработаны рекомендации по очистке природной воды и совершенствованию технологий водоподготовки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Гидрохимические наблюдения проводили ежемесячно в период 2000–2019 гг. на р. Волге в замыкающем створе Куйбышевского и входном створе Саратовского водохранилищ. Пробы воды отбирали с поверхностного горизонта батометром Молчанова с причальной стенки, расположенной на левом берегу Саратовского водохранилища в 2,5 км ниже по течению от Жигулевской плотины.

Химический анализ проб воды проводили по следующим показателям: перманганатная окисляемость (ПО), бихроматная окисляемость (БО), нитраты (NO_3^-) и фосфаты (PO_4^{3-}). Определение ПО и БО выполнялось титриметрическим, а концентрации нитратов и фосфатов – фотометрическим методами в соответствии с действующими нормативными документами. Диапазоны измеряемых концентраций веществ и показатели точности измерений (границы погрешности при вероятности $P = 0,95$) представлены в табл. 1.

Данные химического анализа формировались в ряды, которые подвергались статистической обработке с использованием программы Statistica v 6.0. По каждому химическому показателю для каждого месяца года формировались выборки из 20 членов ряда (2000–2019 гг.), по которым определены средняя, максимальная и минимальная концентрации и среднее квадратичное отклонение (σ).

Таблица 1. Диапазон и точность измерения показателей качества воды
Table 1. Measurement range and accuracy of water quality indicators

Показатель	Диапазон измерений	Руководящий документ	Показатель точности
ПО	2,0–100 мгО/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.154-99	±10 %
ХПК	10,0–80,0 мгО/дм ³	ПНД Ф 14.1:2.100-97	±24 %
NO ₃ ⁻	0,1– 3,0 мгN/дм ³	ПНД Ф 14.1:2.4-95	± 0,18×X
PO ₄ ³⁻	0,01–0,2 мгP/дм ³	РД 52.24.382-2006	±0,002+0,092×X

Примечание: X – измеренная концентрация вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным многолетних наблюдений установлено, что процесс «цветения» воды на Куйбышевском водохранилище отмечается ежегодно в период летней межени. Преобладают синезеленые, диатомовые, зеленые водоросли, при этом именно синезеленые водоросли вызывают «цветение» воды на акватории (рис. 1) и в прибрежной части (рис. 2) водохранилища.

Масштабы, интенсивность и продолжительность процесса «цветения» воды зависят от гидрометеорологических условий, биогенной нагрузки, режима регулирования водного стока. По акватории водохранилища этот процесс характеризуется пространственной неоднородностью: более интенсивно он протекает на мелководье, в заливах, устьях притоков, где стоковое течение практически отсутствует. Здесь биомасса цианобактерий может достигать 100–150 мг/дм³. При ветровых нагонах формируются обширные пятна «цветения» воды, где биомасса цианобактерий в поверхностном слое может увеличиваться в русловой части до 400 мг/дм³, а в пойменной – до 2000 мг/дм³. В нижней части водохранилища, где расположен водозабор г. Тольятти, биомасса цианобактерий изменяется от 3 до 43 мг/дм³, их численность – от 23 до 80 млн кл/ дм³ [12–14].



Рис. 1. «Цветение» воды на акватории Куйбышевского водохранилища.

Fig. 1. «Blooming» of water in the water area of the Kuibyshev reservoir.



Рис. 2. «Цветение» воды в прибрежной части Куйбышевского водохранилища.
Fig. 2. «Blooming» of water in the coastal part of the Kuybyshev reservoir.

В период «цветения» уменьшается содержание в воде биогенных веществ, таких как нитраты и фосфаты. При снижении концентрации фосфатов до нуля массовое развитие цианобактерий прекращается [15]. Средняя годовая концентрация нитратов составила $0,76 \text{ мгN/дм}^3$. Средние месячные значения (N_{cp}) изменялись от $0,41$ до $1,26 \text{ мгN/дм}^3$, максимальные (N_{max}) – от $1,13$ до $2,37 \text{ мгN/дм}^3$, минимальные (N_{min}) – от $0,2$ до $0,52 \text{ мгN/дм}^3$ (табл. 2). Наибольшая концентрация нитратов наблюдалась перед началом весеннего половодья, в период половодья она падала и достигала минимальных значений в июле (рис. 3).

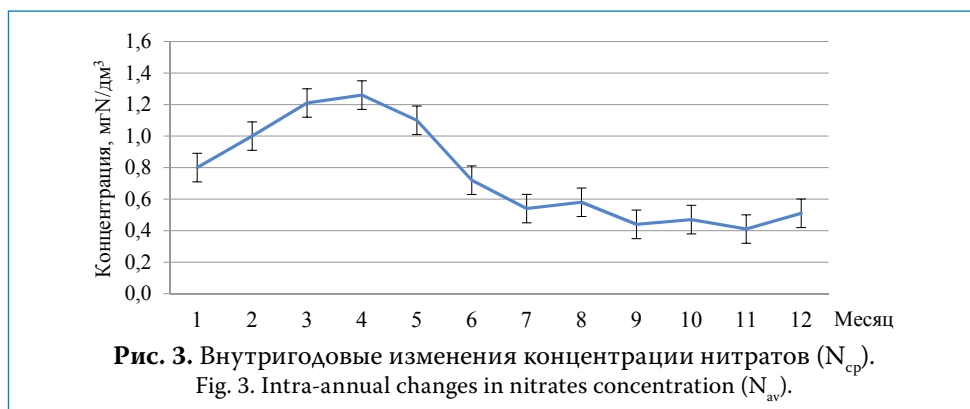
Таблица 2. Внутригодовые изменения концентрации нитратов (N_{cp}) и фосфатов (P_{cp})

Table 2. Intra-annual changes in the concentration of nitrates (N_{av}) and phosphates (P_{av})

Показатель	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Нитраты (NO_3^-), мгN/дм^3												
N_{cp}	0,80	1,00	1,21	1,26	1,10	0,72	0,54	0,58	0,44	0,47	0,41	0,51
σ_N	0,37	0,40	0,44	0,52	0,38	0,31	0,38	0,57	0,36	0,42	0,25	0,26
N_{max}	1,76	1,89	2,37	2,35	1,96	1,33	1,24	1,92	1,46	1,28	1,13	1,28
N_{min}	0,42	0,42	0,52	0,42	0,47	0,21	0,11	0,14	0,12	0,12	0,20	0,26
Фосфаты (PO_4^{3-}), мкгP/дм^3												
P_{cp}	74	74	74	64	47	29	31	43	66	89	95	84
σ_P	15	01	15	17	25	11	14	29	23	25	22	17
P_{max}	113	95	107	87	122	52	56	149	109	146	136	107
P_{min}	37	58	52	12	10	11	10	25	17	42	47	40

Внутригодовые изменения содержания фосфатов в воде имеют ярко выраженный сезонный ход, а амплитуда внутригодовых колебаний зависит

от интенсивности процесса массового развития водорослей [16]. Средняя годовая концентрация фосфатов – 65 мкгР/дм³. В течение года средние месячные значения (P_{cp}) изменялись в пределах 29–95 мкгР/дм³, максимальные (P_{max}) 52–149 мкгР/дм³, минимальные (P_{min}) 10–58 мкгР/дм³. Наибольшая концентрация фосфатов наблюдается в осеннюю межень, наименьшая – в летнюю, в период массового развития водорослей (рис. 4).



Несмотря на то что концентрация фосфатов и нитратов в воде ниже допустимой нормы, именно они провоцируют процессы «цветения» и ухудшение качества воды. Для восстановления нормального состояния водохранилищ необходимо, прежде всего, снижать содержание в воде биогенных веществ. Это возможно при разработке и внедрении региональных нормативов качества воды, учитывающих природные особенности водных объектов.

В период «цветения» вода приобретает неприятный запах, увеличивается ее цветность, растет щелочная реакция. В поверхностном слое водохранилища резко увеличивается содержание кислорода (200–300 %), а в придонном слое наблюдается его дефицит. Увеличивается содержание в воде органических веществ: наибольшая концентрация органических веществ по перманганатной окисляемости (ПО) наблюдается в пик «цветения» воды: за счет массового развития цианобактерий ПО увеличивается на 10–15 %.

При массовом развитии синезеленых водорослей на водохранилищах особую тревогу вызывает органическое загрязнение воды, о чем свидетельствуют такие интегральные показатели, как ПО и БО в период летней межени. Повышение ПО связано с увеличением количества автохтонного органического вещества за счет интенсивного развития водорослей.

Волжская вода в течение всего года не соответствует нормативным требованиям по интегральным органическим показателям – ПО и БО (табл. 3). Среднее годовое значение перманганатной окисляемости в волжской воде составляет 7,4 мгО/дм³. Средние месячные значения ($ПО_{cp}$) изменяются в пределах 7,0–8,6, максимальные ($ПО_{max}$) – 8,6–13,8, минимальные ($ПО_{min}$) –

4,1–7,1 мгО/дм³. Внутригодовые изменения концентрации перманганатной окисляемости имеют ярко выраженный сезонный ход (рис. 5). Наибольшие средние месячные значения наблюдаются в летнюю межень (июль), в пик «цветения» воды, наименьшие – в зимнюю межень. В результате «цветения» воды ПО увеличивается на 10–15%.



Рис. 4. Внутригодовые изменения концентрации фосфатов ($P_{ав}$).

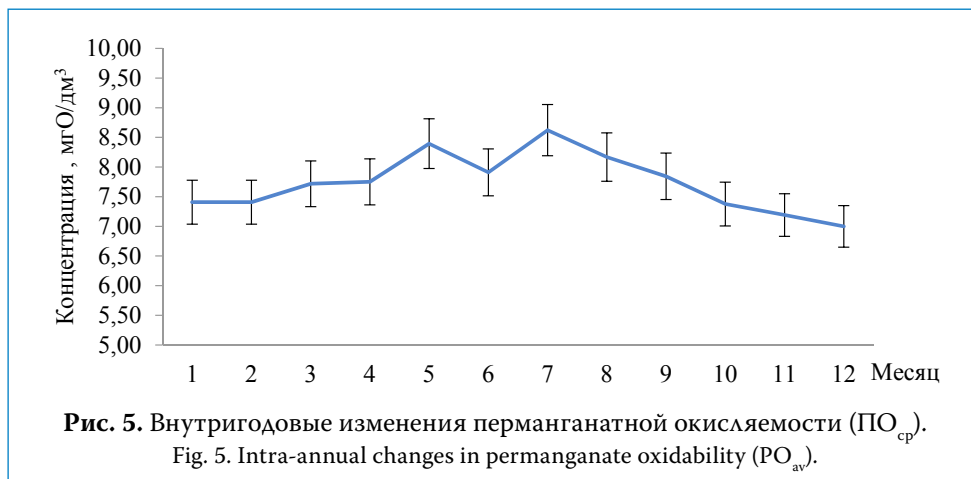
Fig. 4. Intra-annual changes in phosphate concentration ($P_{ав}$).

Таблица 3. Внутригодовые изменения перманганатной (ПО) и бихроматной (БО) окисляемости

Table 3. Intra-annual changes in permanganate (PO) and bichromate (BO) oxidability

Показатель	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ПО, мгО/дм ³												
ПО _{ср}	7,4	7,4	7,7	7,8	8,4	7,9	8,6	8,2	7,8	7,4	7,2	7,0
σ _{по}	1,4	1,4	1,3	1,1	1,2	1,0	1,5	1,3	1,0	1,1	0,8	0,9
ПО _{max}	9,8	13,8	10,7	10,5	9,4	10	12,1	9,8	9,7	9,8	8,6	8,6
ПО _{min}	5,5	4,1	5,2	5,4	5,8	5,5	7,1	6,5	6,2	5,9	6,0	5,3
БО, мгО/дм ³												
БО _{ср}	23	24	25	25	24	27	27	27	27	26	25	25
σ _{бо}	7	7	6	6	8	6	5	5	5	5	4	5
БО _{max}	39	36	35	33	31	35	36	35	34	32	29	33
БО _{min}	12	13	15	14	10	15	17	14	16	15	17	13

Временные изменения концентрации БО имеют ярко выраженный сезонный ход. Среднее годовое значение составляет 25,3 мг/дм³. Средние месячные значения (БО_{ср}) изменяются в пределах 22,9–27,3 мг/дм³, максимальные (БО_{max}) – 28,9–38,7, минимальные (БО_{min}) – 9,5–16,9 мг/дм³. Наибольшие средние месячные значения наблюдались в летнюю межень (июль), в пик «цветения» воды, наименьшие – в зимнюю межень. В период «цветения» воды БО увеличивается на 6–8 %.



Одна из главных причин «цветения» воды и ухудшения ее качества – чрезмерная биогенная нагрузка, которая стала возможной из-за несовершенства системы нормирования антропогенной нагрузки. Критериями при нормировании качества воды водных объектов являются предельно допустимые концентрации, которые одинаковы для всей территории России и зависят только от вида водопользования. В результате устанавливаются ошибочные приоритеты управления антропогенной нагрузкой на водные объекты. Для снижения биогенной нагрузки на водохранилища необходимо приступить к разработке и внедрению региональных (бассейновых) нормативов качества воды, учитывающих природные особенности водных объектов [17].

Другая причина, способствующая массовому развитию синезеленых водорослей и ухудшению качества воды, это глобальное потепление климата и увеличение температуры волжской воды [18]. Анализ временных рядов 455 метеостанций на территории России (в основном ее западной части) за период 1901–1995 гг. показал, что повышение средней годовой температуры составило 0,9 °C/100 лет; 1,3 °C/100 лет – для холодного, 0,3 °C/100 лет – для теплого периодов. Более того, потепление неоднородно в пространстве: наиболее значительным оно оказалось в зоне 50–55° с.ш., уменьшаясь к югу и северу [19].

В перспективе дальнейшее увеличение биогенной нагрузки и повышение глобальной температуры поверхностных вод будут способствовать интенсификации процесса «цветения» воды, увеличению органического загрязнения и ухудшению экологического состояния водохранилищ.

Известно, что цианобактерии родов *Microcystis*, *Anabaena* и *Aphanizomenon* способны к продуцированию таких токсинов, как микроцистины [6]. В настоящее время определено более 80 структурных вариантов микроцистинов, наиболее токсичным является микроцистин-LR [7].

Исследования, проведенные Казанским государственным университетом в 2014–2016 гг. [20], показали, что содержание микроцистинов превышает допустимую концентрацию ВОЗ в русловой части Куйбышевского водохранилища (г. Зеленодольск) и составляет 6–9 мкг/дм³, а в районе г. Казани – 5–12 мкг/дм³. Более значительные концентрации микроцистина обнаружены в пойменных частях водохранилища (200–470 мкг/дм³). Установлено, что концентрация микроцистинов растет с увеличением численности и биомассы цианобактерий. При численности бактерий свыше 21 млн кл/дм³ концентрация микроцистинов может превысить допустимую норму – 1 мкг/дм³.

Оценка экологического состояния Куйбышевского водохранилища свидетельствует о том, что в период массового развития цианобактерий наблюдается ухудшение качества воды и возникает реальная угроза ее токсического загрязнения. Для очистки природной воды до нормативов качества питьевого водоснабжения, как правило, в волжских городах применяются технологические линии, предназначенные для II класса поверхностных источников водоснабжения. Они включают обеззараживание хлорированием или ультрафиолетовым излучением (УФИ), осветление, обесцвечивание и хлорирование воды для подачи воды в водопроводную сеть. Наиболее спорным является использование УФИ на начальной стадии водоподготовки, т. к. излучение убивает бактерии и внутриклеточные токсины попадают в воду.

Использование хлорирования в условиях массового развития цианобактерий вызывает определенное беспокойство в отношении разрыва клеток и высвобождения токсинов. Обработка воды хлором на входе процесса водоподготовки вызывает риск разрушения бактериальных клеток. Кроме того, хлорирование при высоком содержании органических веществ может приводить к образованию в процессе очистки питьевой воды побочных продуктов, включая хлорорганические вещества.

Одни исследователи считают, что перечисленные традиционные стадии водоподготовки в той или иной степени приводят к частичному удалению цианотоксинов. Другие утверждают, что вещества, придающие воде вкус и запах, так же как и токсины водорослей, невозможно удалить в процессе коагуляции-флотации. Поэтому необходимы дополнительные ступени очистки природной воды с применением сорбционных методов и мембранных технологий.

Выбор методов очистки и разработка технологических линий удаления цианотоксинов должны осуществляться с учетом выявления токсинов на двух уровнях – внеклеточном и внутриклеточном [21–24]. Внутриклеточные токсины содержатся в бактериальной клетке и высвобождаются путем выделения, растворения или разрушения клеток, после попадания в воду они становятся внеклеточными. Очистка от внутриклеточного токсина будет эффективна при удалении бактериальных клеток, т. к. основ-

ная часть токсинов (95 %) содержится внутри клетки. Стратегия очистки воды от внеклеточного цианотоксина аналогична очистке воды от природных органических веществ.

Удаление внутриклеточных цианотоксинов необходимо осуществлять без повреждения бактериальных оболочек одноклеточных, нитчатых и колониальных микроорганизмов. Диаметр одноклеточных бактерий превышает 500 нм, их удаление возможно с использованием мембранных технологий, позволяющих фильтровать клетки без механического повреждения. Подходят два типа мембранной фильтрации: микрофильтрация и ультрафильтрация. Учитывая минимальные размеры цианобактерий, можно предположить, что микрофильтрация и ультрафильтрация будут эффективны при удалении неповрежденных цианобактериальных клеток при условии предварительной обработки воды для снижения загрязнения мембран. При массовом развитии цианобактерий в источнике водоснабжения, следует чаще проводить обратную промывку, чтобы снизить риск попадания токсинов в воду.

Удаление внеклеточных токсинов достигается применением мембранной нанофильтрации или адсорбцией на активированном угле. При выборе способа очистки природной воды рекомендуется проводить экспериментальные исследования, поскольку эффективность удаления зависит от распределения размера пор мембраны, активированного угля и качества воды.

Удаление внеклеточного токсина возможно адсорбцией на активированном угле с высокой емкостью пор, диаметр которых менее 1 нм. Есть основания полагать, что активированный уголь эффективен при абсорбции микроцистина. Для полного удаления микроцистинов может потребоваться повторная обработка.

Очевидно, что в целях исключения попадания цианотоксинов в питьевую воду необходимо совершенствование технологий водоподготовки. В период массового развития цианобактерий волжская вода должна обрабатываться на специальной технологической линии, включающей предварительную микрофильтрацию и ультрафильтрацию, УФО, коагуляцию, отстаивание, фильтрацию на активированном угле или нанофильтрацию. Практически полное удаление микроцистина может быть достигнуто только при использовании мембранных технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка экологического состояния Куйбышевского водохранилища показывает, что в период массового развития цианобактерий ухудшается качество воды в поверхностном источнике водоснабжения, возникает реальная угроза загрязнения волжской воды цианотоксинами, в концентрациях превышающих допустимую норму ВОЗ.

В перспективе проблема загрязнения поверхностных источников водоснабжения цианотоксинами будет обостряться по мере роста антропогенной

нагрузки на фоне глобального потепления климата. Поэтому целесообразно направить дополнительные усилия на проведение исследований закономерностей формирования качества воды в условиях массового развития цианобактерий. Необходимо организовать мониторинг содержания цианотоксинов в воде Куйбышевского водохранилища, а также разработать отечественные предельно допустимые концентрации по их содержанию для водных объектов хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного использования.

В настоящее время традиционные технологические линии очистки воды из поверхностных источников водоснабжения, применяемые на станциях водоподготовки в волжских городах, не ориентированы на удаление цианотоксинов, существуют риски попадания токсических веществ в питьевую воду. Необходимо совершенствовать существующие и проектировать новые технологические линии водоподготовки с учетом внедрения микрофльтрации и ультрафльтрации для удаления бактериальных клеток и нанофльтрации для удаления внеклеточного цианотоксина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О национальных целях развития Российской Федерации до 2030 года. Указ Президента РФ № 474 от 21.07.2020 г.
2. Селезнева А.В., Беспалова К.В., Селезнев В.А. Формирование качества воды волжских водохранилищ при аномальных погодных условиях // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 5. С. 4–14.
3. Селезнева А.В., Беспалова К.В., Селезнев В.А. Содержание растворенного неорганического фосфора в воде Куйбышевского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 2. С. 35–45. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-2-3.
4. Селезнева А.В. Оценка диффузного загрязнения Саратовского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 5. С. 101–116.
5. Чернова Е.Н., Русских Я.В., Подольская Е.П., Жаковская З.А. Определение микроцистинов и анатоксина-а методом жидкостной хромато-масс-спектрометрии низкого разрешения // Научное приборостроение. 2016. Т. 26, № 1. С. 11–25.
6. Никитин О.В., Латыпова В.З., Степанова Н.Ю. Мониторинг цианобактериальных токсинов в водных объектах Республики Татарстан (2011-2016 гг.) // Мат-лы межд. научно-практ. конф. «Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водных объектов: проблемы и пути решения». Казань: «ОТ Принт», 2017. С. 51–62.
7. Журкович И.К., Ковров Н.Г., Луговкина Н.В., Мильман Б.Л. Осторожно, микроцистины! // Information on www.j-analytics.ru. 2018. Т. 8 № 5 (42). С. 458–463.
8. M.J. Harke, M.M. Steffen, C.J. Gobler, T.G., Otten, S.W. Wilhelm, S.A. Wood, H.W. Paerl. A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp. Harmful Algae. 2016. Vol. 54. P. 4–20.
9. Селезнева А.В. Экологическое нормирование антропогенной нагрузки на водные объекты. Самара, 2007. 107 с.

10. Селезнев В.А., Селезнева А.В., Беспалова К.В. Антропогенное эвтрофирование крупных водохранилищ Нижней и Средней Волги в условиях глобального потепления климата // Мат-лы Межд. научно-практ. конф. «Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водных объектов: проблемы и пути решения». Казань: Приволжский федеральный университет, 2017. С. 151–156.
11. Технический справочник по обработке воды: пер. с фр. СПб.: Новый журнал, 2007.
12. Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Л.: Наука, 1989.
13. Фитопланктон Нижней Волги. Водоохранилища и низовье реки. СПб.: Наука, 2003.
14. Герасимова Н.А. Фитопланктон Саратовского и Волгоградского водохранилищ. Тольятти, 1996.
15. Беспалова К.В. Оценка состояния источников водоснабжения в условиях антропогенного эвтрофирования водохранилищ // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 11. С. 7–15.
16. Seleznev V. A., Bepalova K. V., Selezneva A. V. Seasonal Variability of Phosphate Content in Volga Water Under Conditions of Anthropogenic Eutrophication of Reservoirs // Journal of Water Chemistry and Technology. 2018. Vol. 40. No. 5. P. 307–311.
17. Селезнев В.А., Селезнева А.В., Беспалова К.В. Разработка бассейновых нормативов качества воды (на примере водных объектов Нижней Волги) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 2. С. 42–53.
18. Литвинов А.С., Пырина И.А., Законнова А.В., Кучай Л.А., Соколова Е.Н. Термический режим и продуктивность фитопланктона Рыбинского водохранилища в условиях изменения климата // Вода: химия и экология. 2014. № 12. С. 108–112.
19. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Зайцева И.С., Какутина Е.А. Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России // Вестник Российской Академии наук. 2019. Т. 89. № 6. С. 603–614.
20. Степанова Н.Ю., Халиуллина Л.Ю., Никитин О.В., Латыпова В.З. Структура и токсичность цианобактерий в рекреационных зонах водоемов Казанского региона // Вода: химия и экология. 2012. № 11. С. 67–72.
21. Westrick J.A., Szlag D. C., Southwell B. J., Sinclair J. A review of cyanobacteria and cyanotoxins removal/inactivation in drinking water treatment // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2010. Vol. 397. No. 5. P. 1705–1714.
22. Liu Y., Ren J., Wang X., Fan Z. Mechanism and reaction pathways for microcystin-LR degradation through UV/H₂O₂ treatment // PloS one. 2016. Vol. 11. N. 6. P. 156–236.
23. Li J., Li R. Current research scenario for microcystins biodegradation – A review on fundamental knowledge, application prospects and challenges // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 595. P. 615–632.
24. Fagan R., Cormack D.E., Dionysiou D.D., Pillai S.C. A review of solar and visible light active TiO₂ photocatalysis for treating bacteria, cyanotoxins and contaminants of emerging concern // Materials Science in Semiconductor Processing. 2016. Vol. 42. P. 2–14.

Для цитирования: Беспалова К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Питьевое водоснабжение в условиях массового развития синезеленых водорослей на водохранилищах // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 2. С. 121–134.

Сведения об авторах:

Беспалова Ксения Владимировна, канд. хим. наук, научный сотрудник, лаборатория мониторинга водных объектов, Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук, Россия, 445004, г. Тольятти, ул. Комзина, 10; e-mail: kvbespalova@yandex.ru

Селезнева Александра Васильевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов, Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук, Россия, 445004, г. Тольятти, ул. Комзина, 10; e-mail: Aleks.selezneva@mail.ru

Селезнев Владимир Анатольевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, лаборатория мониторинга водных объектов, Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук, Россия, 445004, г. Тольятти, ул. Комзина, 10; e-mail: seleznev53@mail.ru

**DRINKING WATER SUPPLY UNDER THE CONDITIONS
OF MASS DEVELOPMENT OF BLUE-GREEN ALGAE IN RESERVOIRS**

Ksenia V. Bespalova^{1,2}, Aleksandra V. Selezneva¹, Vladimir. A. Seleznev^{1,2}

¹*Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, Togliatti, Russia*

²*Togliatti State University, Togliatti, Russia*

E-mail: seleznev53@mail.ru

Abstract: An assessment of the pollution of a surface source of water supply (the Kuibyshev reservoir) with metabolites of cyanobacteria (blue-green algae) under conditions of an increase in biogenic load is carried out. During the period of mass development of cyanobacteria, the quality of water in the reservoir deteriorates in terms of a number of indicators, including smell, taste, and content of organic and toxic substances. Among the wide range of cyanoxins, the greatest danger to the population is microcystin-LR, the concentration of which in drinking water should not exceed 1 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$. The growth of anthropogenic load and global warming of the climate create favorable conditions for the rapid development of cyanobacteria, therefore, the problem of providing the population with high-quality drinking water will only worsen in the future.

Traditional methods used at drinking water treatment plants in Volga cities are ineffective in removing intracellular and extracellular cyanotoxins. The best and safest barrier against the ingress of cyanotoxins into drinking water can be membrane technologies that allow ultrafiltration of bacterial cells without mechanical damage and nanofiltration of cyanotoxins dissolved in water.

Key words: water supply sources, reservoirs, water quality, cyanobacteria, toxins, microcystin-LR, removal methods, membrane technologies.

About the authors:

Ksenia V. Bespalova, Candidate of Chemical Sciences, Researcher, Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences Institute of Ecology of the Volga River Basin laboratory of the water bodies monitoring, ul. Komzina, 10, Togliatti, 445004, Russia; e-mail: kvbespalova@yandex.ru

Aleksandra V. Selezneva, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences Institute of Ecology of the Volga

River Basin laboratory of the water bodies monitoring, ul. Komzina, 10, Togliatti, 445004, Russia; e-mail: aleks.selezneva@mail.ru

Vladimir A. Seleznev, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences Institute of ecology of the Volga River Basin laboratory of the water bodies monitoring, ul. Komzina, 10, Togliatti, 445004, Russia; e-mail: seleznev53@mail.ru

For citation: *Bespalova K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Drinking Water Supply under the Conditions of Mass Development of Blue-green Algae in Reservoirs // Water Sector of Russia. 2021. No. 2. P. 121–134.*

REFERENCES

1. O natsionalnykh tselyakh razvitiya Rossyskoy Federatsiyi do 2030 goda [About national objectives of development of the Russian Federation up to 2030]. Ukaz prezidenta RF № 474 ot 21.07.2020 g.
2. *Selezneva A.V., Bespalova K.V., Seleznev V.A.* Formirovaniye kachestva vody volzhskikh vodokhranilishch pri anomalnykh prirodnykh usloviyakh [The Volga reservoirs water quality formation in case of abnormal weather conditions] // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2013. № 5. Pp. 4–14.
3. *Selezneva A.V., Bespalova K.V., Seleznev V.A.* Soderzhaniye rastvorennogo neorganicheskogo fosfora v vode Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [The non-organic phosphorous content in water of the Kuybyshev reservoir] // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018. № 2. Pp. 35–45. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-2-3.
4. *Selezneva A.V.* Otsenka diffuznogo zagryazneniya Saratovskogo vodokhranilishcha [The Saratov reservoir diffuse pollution estimation] // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018. № 5. Pp. 101–116.
5. *Chernova E.N., Russkikh Y.V., Podolskaya E.P., Zhakovskaya Z.A.* Opredeleniye mikrotsistinov i anatoksinov-a metodom zhidkistnoy khromato-mass-spektrometriyi nikogo razresheniya [Determination of microcystines and anatoxine-a with the method of liquid chromatography-mass spectrometry of low resolution] // *Nauchnoye priborostroyeniye*. 2016. Vol. 26. № 1. Pp. 11–25.
6. *Nikitin O.V., Latypova V.Z., Stepanova N.Y.* Monitoring tsianobakterialnykh toksinov v vodnykh obyektakh Respubliki Tatarstan (2011-2016 gg.) [Monitoring of cyanobacteria toxins in water bodies of the republic of Tatarstan (2011-2016)] // *Materialy mezhd. nauchno-prakt. konf. "Globalnoye rasprostraneniye protsessov antropogennogo evtrofirovaniya vodnykh obyektov: problemy i puti ikh resheniya"*. Kazan: «OT Print», 2017. Pp. 51–62.
7. *Zhurkovich I.K., Kovrov N.G., Lugovkina N.V., Milman B.L.* Ostorozhno, mikrotsistiny! [Attention, microcystines!] // *Information on www.j-analytics.ru*. 2018. T. 8 № 5 (42) Pp. 458-463.
8. *M.J. Harke, M. M. Steffen, C.J. Gobler, T. G., Otten, S.W. Wilhelm, S.A. Wood, H.W. Paerl.* A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp. *Harmful Algae*. 2016. Vol. 54. P. 4–20.
9. *Selezneva A.V.* Ekologicheskoye normirovaniye antropogennoy nagruzki na vodniye obyektory [Ecological regulation of anthropogenic load upon water bodies]. Samara, 2007. 107 p.
10. *Seleznev V.A., Selezneva A.V., Bespalova K.V.* Antropogennoye evtrofirovaniye krupnykh vodokhranilishch Nizhney i Sredney Volgi v usloviyakh globalnogo potepleniya klimata [Anthropogenic eutrophication of the Lower and Middle Volga reservoirs in the conditions of the global climate warming] // *Materialy Mezhd. nauch-prakt. konf. "Globalnoye rasprostraneniye protsessov antropogennogo evtrofirovaniya vodnykh obyektov: problemy i puti resheniya"* Kazan: Privolzhskiy federalniy universitet, 2017. Pp. 151–156.

11. *Tekhnicheskiy spravochnik po obrbotke vody* [Technical reference-book on water treatment]: per. s fr. SPb.: Noviy zhurnal, 2007.
12. *Ekologiya fitoplanktona Kuybyshevskogo vodokhranilishcha* [The Kuybyshev reservoir phytoplankton ecology]. L.: Nauka, 1989.
13. *Fitoplankton Nizhney Volgi. Vodokhranilishcha i nizovye reki* [the Lower Volga phytoplankton. Reservoirs and the river downstream]. SPb.: Nauka, 2003.
14. *Gerasimova N.A. Fitoplankton Saratovskogo i Volgogradskogo vodokhranilishch* [The Saratov and Volgograd reservoirs phytoplankton]. Togliatti, 1996.
15. *Bespalova K.V. Otsenka sostoyaniya istochnikov vodosnabzheniya v usloviyakh antropogennogo evtrofirovaniya vodokhranilishch* [Assessment of the water supply sources status in the conditions of the reservoirs anthropogenic eutrophication] // *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. 2016. № 11. Pp. 7–15.
16. *Seleznev V.A., Bespalova K.V., Selezneva A.V. Seasonal Variability of Phosphate Content in Volga Water Under Conditions of Anthropogenic Eutrophication of Reservoirs* // *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2018. Vol. 40. No. 5. P. 307–311.
17. *Seleznev V.A., Selezneva A.V., Bespalova K.V. Razrabotka basseynovykh normativov kachestva vody (na primere vodnykh obyektov Nizhney Volgi)* [Development of the basin norms of water quality (the Lower Volga water bodies as a study case)] // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2013. № 2. C. 42–53.
18. *Litvinov A.S., Pyrina I.L., Zakonova A.V., Kuchay L.A., Sokolova E.N. Termicheskiy rezhim i produktivost fitoplanktona Rybinskogo vodokhranilishcha v usloviyakh izmeneniya klimata* [The Rybinsk reservoir phytoplankton thermal regime and productivity in the conditions of climate changes] // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2014. № 12. Pp. 108–112.
19. *Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Zaytseva I.S., Kashutina E.A. Otsenka antropogennykh vozdeystviy na vodniye resursy Rossii* [Assessment of anthropogenic impacts upon water resources of Russia] // *Vestnik Rossiyskoy Akademii nauk*. 2019. T. 89. № 6. Pp. 603–614.
20. *Stepanova N.Y., Khaliullina L.Y., Nikitin O.V., Latypova V.Z. Struktura i toksichnost tsiaanobakteriy v rekreatsionnykh zoonakh vodoyomov Kazanskogo regiona* [Structure and toxicity of cyanobacteria in recreation zones of the Kazan region] // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2012. № 11. Pp. 67–72.
21. *Westrick J.A., Szlag D. C., Southwell B. J., Sinclair J. A review of cyanobacteria and cyanotoxins removal/inactivation in drinking water treatment* // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2010. Vol. 397. No. 5. P. 1705–1714.
22. *Liu Y., Ren J., Wang X., Fan Z. Mechanism and reaction pathways for microcystin-LR degradation through UV/H₂O₂ treatment* // *PloS one*. 2016. Vol. 11. № 6. P. 156–236.
23. *Li J., Li R. Current research scenario for microcystins biodegradation – A review on fundamental knowledge, application prospects and challenges* // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 595. P. 615–632.
24. *Fagan R., Cormack D.E., Dionysiou D.D., Pillai S.C. A review of solar and visible light active TiO₂ photocatalysis for treating bacteria, cyanotoxins and contaminants of emerging concern* // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2016. Vol. 42. P. 2–14.