

ЗОНА ТЕМПЕРАТУРНОГО ОПТИМУМА ЦИАНОБАКТЕРИЙ В КУЙБЫШЕВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

© 2023 К.В. Селезнева², А.В. Селезнева¹, В.А. Селезнев¹

¹ Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна РАН,
г. Тольятти, Россия

² Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

Статья поступила в редакцию 25.08.2023

По результатам гидрометеорологических наблюдений в период 2016–2021 годов определены параметры зоны температурного оптимума (ЗТО) для процесса массового развития цианобактерий в Куйбышевском водохранилище. Такие параметры зоны оптимума, как продолжительность, интенсивность, верхняя и нижняя границы зависят от гидрометеорологических условий конкретного года. Для периода 2016–2021 годов средняя продолжительность ЗТО составила 44 дня, наибольшая – 72 дня и наблюдалась в 2021 году, а наименьшая – 11 дней и наблюдалась в 2019 году. Наибольшая интенсивность ЗТО наблюдалась в 2021 году, когда 10 дней характеризовались слабой интенсивностью, 15 дней – умеренной интенсивностью, 23 дня – сильной интенсивностью, 24 дня – очень сильной и 7 дней – экстремальной интенсивностью. Наименьшая интенсивность наблюдалась в 2019 году, когда 10 дней характеризовались слабой интенсивностью и 1 день сильной интенсивностью. Верхняя граница ЗТО в 2021 году наблюдалась 21 июня, а нижняя – 1 сентября. В 2019 году верхняя граница наблюдалась 23 июня, а нижняя – 26 июля. Для процесса массового развития цианобактерий наиболее благоприятным является 2021 год, а неблагоприятным – 2019 год. Установлено, что с ростом температуры воздуха и воды увеличивалась продолжительность и степень интенсивности зоны температурного оптимума. Следовательно, при дальнейшем росте температуры воздуха из-за глобального потепления климата продолжительность и интенсивность зоны температурного оптимума будет только увеличиваться, что активизирует процесс массового развития цианобактерий, что негативно отразится на экологическом состоянии и качестве воды Куйбышевского водохранилища.

Ключевые слова: Куйбышевское водохранилище, глобальное потепление, температура воды, цианобактерии, зона оптимума, межгодовые изменения.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-5-155-163

EDN: YUPPHZ

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(номер проекта 23-27-10008).*

ВВЕДЕНИЕ

Процесс массового развития цианобактерий (МРЦ) является характерным явлением для крупных равнинных водохранилищ с замедленным водным обменом [1–8]. В период летней межени процесс МРЦ негативно влияет на формирование качества вод. Вода приобретает неприятный запах и специфический цвет, увеличивается рН и содержание в воде органических веществ, нарушается кислородный режим [9–11], появляется угроза токсического загрязнения [12, 13]. В этих условиях возникают риски использования водоемов для хозяйственно-питьевого водоснабжения, рыбного хозяйства и рекреации.

*Селезнева Ксения Владимировна, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов ИЭВБ РАН, доцент ТГУ.
E-mail: kvbespalova@yandex.ru*
Селезнева Александра Васильевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов. E-mail: aleks.selezneva@mail.ru
Селезнев Владимир Анатольевич, доктор технических наук, кандидат географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов. E-mail: seleznev53@mail.ru

Распространение, продолжительность и интенсивность процесса МРЦ существенно зависят от гидрометеорологических факторов и, прежде всего, от температуры воды. С её увеличением процесс МРЦ активизируется, поскольку повышение температуры воды способствует высокой активности и росту цианобактерий [14, 15]. Кроме того, повышение температуры воды может не только способствовать росту цианобактерий, но и оказывать влияние на образование токсинов. Предполагается, что некоторые виды цианобактерий, не образующие токсинов, при повышении температуры воды начинают синтезировать токсины [16, 17].

Один из важнейших показателей глобального потепления климата является тренд на повышение температура приземного слоя атмосферы. По данным Росгидромета за последние 100 лет общее повышение температуры воздуха для территории России составило 1,0 °С, что на 0,4 °С выше, чем в среднем для Земного шара. Начиная с 70-х годов прошлого века каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего. В последние годы повышение температуры воздуха происходит наиболее интенсивно. Согласно данным Всемирной метеорологической организации 2021 год стал седьмым годом подряд, когда глобальная температура воздуха была выше до индустриального уровня (1850-1900 гг.) более, чем на 1 °С. Ряд авторов полагает, что наблюдаемое глобальное потепление и повышение температуры поверхностных вод [18] следует рассматривать как важнейший природный процесс, способствующий стремительному распространению и доминированию цианобактерий в водохранилищах Средней и Нижней Волги [19-21].

Процесс МРЦ и его воздействие на формирование качества воды активно исследуют во всем мире. Уже достигнуты определенные успехи, однако многие вопросы, которые характеризуют количественные параметры процесса для конкретных водоемов при различных тем-

пературных условиях, пока изучены недостаточно. Настоящая статья посвящена определению продолжительности и интенсивности зоны температурного оптимума для процесса МРЦ на самом крупном в Европе Куйбышевском водохранилище.

Количественные параметры зоны температурного оптимума зависят от гидрометеорологических условий конкретного года, поэтому в перспективе представляется возможным их прогнозировать при различных сценариях глобальных или региональных климатических изменений.

Для оценки этих параметров выбраны последние шесть лет (2016-2021), которые представляют особый интерес из-за роста температуры приземного слоя атмосферного воздуха в Волжском бассейне.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Куйбышевское водохранилище является самым крупным в Европе и расположено в центральной части Волжского бассейна (рис. 1). Входным створом по Волжской ветке является Чебоксарская ГЭС, по Камской ветке – Нижнекамская ГЭС, а замыкающий створ – Жигулев-



Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений за температурой воды на водохранилище Чебоксарская ГЭС; 2- Нижнекамская ГЭС; 3 – Жигулевская ГЭС)

ская ГЭС. Общая длина водохранилища с учетом волжской и камской веток составляет 750 км, площадь – 6450 км², максимальная ширина – 41 км, максимальная глубина – 50 м при нормальном подпорном уровне 53 м БС.

Для массового развития цианобактерий на водохранилище температурный фактор является решающим, поэтому так важно выделять зону температурного оптимума (ЗТО) цианобактерий, определить её параметры: время начала и окончания процесса, его продолжительность и интенсивность, которые зависят от гидрометеорологических условий конкретного года.

Изучение термического режима водохранилища проводится с момента его создания. Систематические измерения поверхностной температурой воды на гидрологических постах, равномерно расположенных по длине водоема, проводятся в прибрежной зоне водохранилища два раза в сутки (8 и 20 часов).

По данным наблюдений на гидрологических постах Росгидромета [22], средняя температура воды за летний период (июнь-август) на разных участках водохранилища изменяется незначительно в пределах 18,9-19,4 °С. В северной части водохранилища на Волжской ветке (с. Вязовые) температура воды составляет 19,2 °С, на Камской ветке (с. Сокольи Горы) – 18,9 °С, в зоне смешения волжских и камских вод (г. Тетюши) – 19,5 °С и в центральной части (г. Сенгилей) – 19,4 °С, в южной части (г. Тольятти) – 19,1 °С. В сезонном разрезе наибольшая температура воды наблюдается в июле 20,8 °С, а наименьшая в июне – 17,0 °С. Однако, этих данных для определения параметров ЗТО явно недостаточно, нужны ежедневные данные наблюдений за температурой воды.

Для исследования зоны термического оптимума (ЗТО) применительно к процессу массового развития цианобактерий (МРЦ) использованы данные гидрометеорологических наблюдений в южной части водоема в период 2016-2021 годов. Измерения приземной температуры воздуха проводились на метеостанции города Тольятти. Для анализа использовались значения температуры воздуха на 8 часов. Си-

стематические наблюдения за поверхностной температурой воды проводились в прибрежной зоне водохранилища (г. Тольятти). Измерения осуществлялись ежедневно в 8 часов поверхностным (родниковым) термометром в оправе Шпиндлера на глубине не менее 1 м. Цена деления термометра 0,2 °С, следовательно, отсчет с термометра снимался с точностью до 0,1 °С.

Для анализа временных рядов выбран эмпирический метод, основанный на обработке имеющихся данных гидрометеорологических наблюдений. В качестве критерия для определения параметров зоны термического оптимума выбрано значение температуры воды, равное 22 °С. Количество дней, с температурой воды ≥ 22 °С, рассматривается как продолжительность зоны температурного оптимума. Количество дней, с различной температурой воды, характеризует степень интенсивности зоны температурного оптимума. Интенсивность температурного оптимума подразделяется на градации: слабая (23 °С $> t \geq 22$ °С), умеренная (24 °С $> t \geq 23$ °С), сильная (25 °С $> t \geq 24$ °С), очень сильная (26 °С $> t \geq 25$ °С) и экстремальная ($t \geq 26$ °С).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных наблюдений за период 2016-2021 годов показал (табл. 1), что температура воздуха (Т) в летний период (июнь-август) разных лет составляла 21,1-23,8 °С и была выше нормы на 2,0-4,7 °С, установленной для периода 1952-1979 годов [23]. За период 2016-2021 годов самым теплым оказался 2021 год, а холодным – 2017 год. Среди летних месяцев июль оказался самым теплым для 2018-2021 годов, а август – для 2016 и 2017 годов.

Температура воды (t) летом в период 2016-2021 годов изменялась в пределах 19,2-23,1 °С и превысила норму на 2,0-3,7 °С, установленную для периода 1957-1980 годов [22], на 2,0-3,7 °С. Благодаря этому, сложились благоприятные температурные условия для процесса МРЦ. Однако, такие параметры, как продолжительность и интенсивность зоны температурного оптимума

Таблица 1. Температура воздуха и воды в летний период 2016-2021 годов

Год	Месяц				Месяц			
	VI	VII	VIII	VI- VIII	VI	VII	VIII	VI- VIII
	Температура воздуха (Т)				Температура воды (t)			
2016	20,3	23,6	24,1	22,7	19,5	22,6	24,1	22,1
2017	18,5	22,2	22,6	21,1	15,2	20,0	22,3	19,2
2018	20,3	24,2	21,7	22,1	16,2	23,4	22,8	20,8
2019	22,4	23,1	18,3	21,3	20,3	21,6	19,7	20,5
2020	18,9	25,3	19,5	21,2	17,9	23,0	21,2	20,7
2021	22,8	24,6	23,9	23,8	20,7	24,3	24,2	23,1
Норма	18,3	20,3	18,6	19,1	16,6	20,5	20,3	19,1

ма (ЗТО) существенно отличались год от года. Самым теплым оказался 2021 год.

2016 год. За летний период (июнь-август) средняя температура воздуха (Т) составила 22,7 °С (табл. 1) и превысила норму на 3,7 °С. Максимальная средняя месячная температура наблюдалась в августе и составила 24,1 °С. Превышение нормы для средней месячной температуры воздуха составило: в июне - на 2,0 °С, в июле - на 3,3 °С, в августе - на 5,5 °С. Количество дней с $T \geq 22$ °С составила 60. Из них количество дней с температурой в диапазоне (23 °С > T ≥ 22 °С) составило 8, в диапазоне (24 °С > T ≥ 23 °С) - 11, в диапазоне (25 °С > T ≥ 24 °С) - 17, в диапазоне (26 °С > T ≥ 25 °С) - 8, в диапазоне (27 °С > T ≥ 26 °С) - 6, в диапазоне (28 °С > T ≥ 27 °С) - 4, в диапазоне (29 °С > T ≥ 28 °С) - 5, в диапазоне (30 °С > T ≥ 29 °С) - 0, в диапазоне (31 °С > T ≥ 30 °С) - 1.

За летний период (июнь-август) средняя температура воды (t) составила 22,1 °С (табл. 1) и превысила норму на 3,0 °С. Превышение нормы для средней месячной температуры воды составило: в июне на 2,9 °С, в июле - на 2,1 °С, в августе - на 3,8 °С. В летней период выделены 2 зоны температурного оптимума для процесса МРЦ, когда наблюдался устойчивый переход температуры через 22 °С. Первая зона оптимума продолжалась всего 8 дней и наблюдалась с 21 по 28 июня (рис. 2). Вторая продолжительная (58 дней) зона оптимума наблюдалась с 5 июля по 1 сентября. Объединенная за летний период зона оптимума составила 66 дней. Слабая интенсивность оптимума (23 °С > t ≥ 22 °С) наблюдалась 22 дня, умеренная (24 °С > t ≥ 23 °С) - 20 дня, сильная (25 °С > t ≥ 24 °С) - 23 дня и очень сильная (26 °С > t ≥ 25 °С) - 1 день.

2017 год. Летом средняя температура воздуха (Т) составила 21,1 °С (табл.1) и превысила норму всего на 2,0 °С. Максимальная средняя месячная температура наблюдалась в августе и составила 22,6 °С. Превышение нормы для средней месячной температуры воздуха составило: в июне - на 0,2 °С, в июле - на 1,9 °С, в августе - на 4,0 °С. Количество дней с $T \geq 22$ °С составила 40. Из них количество дней с температурой в диапазоне (23 °С > T ≥ 22 °С) составило 11, в диапазо-

не (24 °С > T ≥ 23 °С) - 7, в диапазоне (25 °С > T ≥ 24 °С) - 6, в диапазоне (26 °С > T ≥ 25 °С) - 7, в диапазоне (27 °С > T ≥ 26 °С) - 3, в диапазоне (28 °С > T ≥ 27 °С) - 4, в диапазоне (29 °С > T ≥ 28 °С) - 1, в диапазоне (30 °С > T ≥ 29 °С) - 1, в диапазоне (31 °С > T ≥ 30 °С) - 0.

За летний период средняя температура воды (t) составила 19,2 °С (табл. 1) и превысила норму всего на 0,1 °С. Средняя месячная температуры воды была ниже нормы: в июне на 1,4 °С, в июле - на 0,5 °С, а в августе выше нормы на 2,0 °С. В летней период выделены 2 зоны температурного оптимума. Первая зона продолжалась 17 дней и наблюдалась с 29 июля по 14 августа (рис. 2). Вторая короткая зона наблюдалась 9 дней с 20 по 28 августа. Суммарная продолжительность ЗТО составила 27 дней. Из них количество дней с интенсивностью температурного фактора (с $t \geq 23$ °С) составило 5 дней. Слабая интенсивность оптимума (23 °С > t ≥ 22 °С) наблюдалась 21 день и умеренная (24 °С > t ≥ 23 °С) - 5 дней.

2018 год. Летом средняя температура воздуха (Т) составила 22,1 °С (табл. 1) и превысила норму на 3,0 °С. Максимальная средняя месячная температура наблюдалась в июле и составила 24,2 °С. Превышение нормы для средней месячной температуры воздуха составило: в июне - на 2,0 °С, в июле - на 3,9 °С, в августе - на 3,1 °С. Количество дней с $T \geq 22$ °С составило 52 дня. Из них количество дней с температурой в диапазоне (23 °С > T ≥ 22 °С) составило 5, в диапазоне (24 °С > T ≥ 23 °С) - 7, в диапазоне (25 °С > T ≥ 24 °С) - 9, в диапазоне (26 °С > T ≥ 25 °С) - 10, в диапазоне (27 °С > T ≥ 26 °С) - 13, в диапазоне (28 °С > T ≥ 27 °С) - 4, в диапазоне (29 °С > T ≥ 28 °С) - 3, в диапазоне (30 °С > T ≥ 29 °С) - 0, в диапазоне (31 °С > T ≥ 30 °С) - 1.

За летний период средняя температура воды (t) составила 20,8 °С (табл. 1) и превысила норму на 1,7 °С. В июне температура воды была ниже нормы 0,4 °С, а июле превышение нормы составило 2,9 °С, в августе - 2,5 °С (рис. 3). Летом выделены 2 зоны температурного оптимума: первая наблюдалась 23 дня с 1 по 23 июня, а вторая наблюдалась 28 дней с 25 июля по 21 августа (рис. 3). Суммарная за лето продолжительность

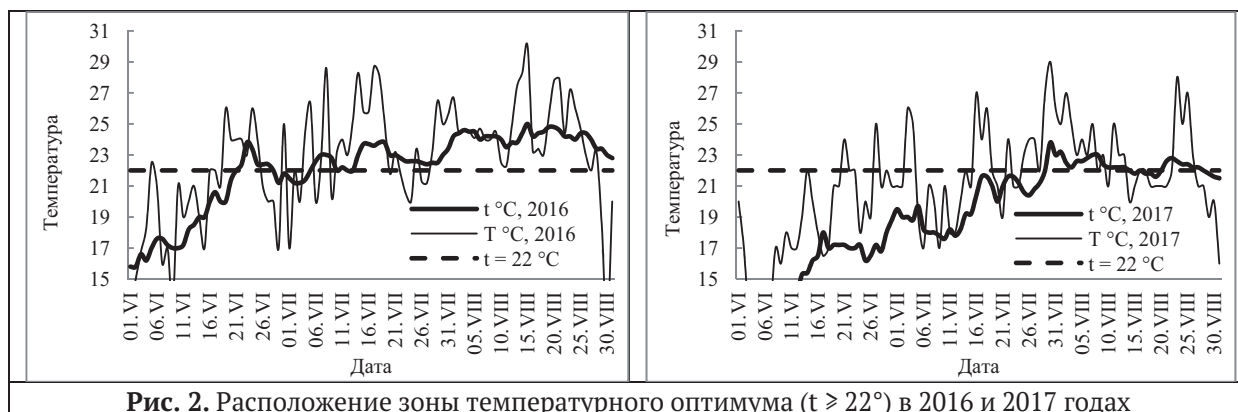


Рис. 2. Расположение зоны температурного оптимума ($t \geq 22$ °С) в 2016 и 2017 годах

ЗТО составила 52 дня. Из них количество дней с интенсивностью температурного фактора ($s \ t \geq 23 \text{ }^\circ\text{C}$) составило 25, $s \ t \geq 24 \text{ }^\circ\text{C}$ – 8, $s \ t \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ – 1. Слабая интенсивность оптимума ($23 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$) наблюдалась 27 дней, средняя ($24 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 23 \text{ }^\circ\text{C}$) – 16 дней, сильная ($25 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 24 \text{ }^\circ\text{C}$) – 28 дней и очень сильная ($26 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$) – 1 день.

2019 год. Летом средняя температура воздуха (T) составила $21,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 1) и превысила норму на $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная средняя месячная температура наблюдалась в июле и составила $23,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Превышение нормы в июне составило $4,1 \text{ }^\circ\text{C}$, в июле – $2,8 \text{ }^\circ\text{C}$. В августе температура воздуха была ниже нормы на $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Количество дней с $T \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ составило 48 дней. Из них количество дней с температурой в диапазоне ($23 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$) составило 9, в диапазоне ($24 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 23 \text{ }^\circ\text{C}$) – 11, в диапазоне ($25 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 24 \text{ }^\circ\text{C}$) – 4, в диапазоне ($26 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$) – 9, в диапазоне ($27 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 26 \text{ }^\circ\text{C}$) – 5, в диапазоне ($28 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 27 \text{ }^\circ\text{C}$) – 6, в диапазоне ($29 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 28 \text{ }^\circ\text{C}$) – 2, в диапазоне ($30 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 29 \text{ }^\circ\text{C}$) – 2, в диапазоне ($31 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) – 0.

За летний период средняя температура воды (t) составила $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 1) и превысила норму на $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Превышение нормы для средней месячной температуры воды составило: в июне на $1,3 \text{ }^\circ\text{C}$, в июле – на $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$, в августе – на $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Летом выделены 2 зоны температурного оптимума: первая наблюдалась 5 дней с 23 по 27 июня, а вторая – 6 дней с 21 по 26 июля (рис. 3). Суммарная за лето продолжительность ЗТО составила 11 дней. Слабая интенсивность оптимума ($23 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$) наблюдалась 10 дней, средняя ($24 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 23 \text{ }^\circ\text{C}$) – отсутствовала и сильная ($25 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 24 \text{ }^\circ\text{C}$) – 1 день.

2020 год. Летом средняя температура воздуха (T) составила $21,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 1) и превысила норму на $2,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная средняя месячная температура наблюдалась в июле и составила $25,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Превышение нормы для средней месячной температуре воздуха составило: в

июне – на $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, в июле – на $5,0 \text{ }^\circ\text{C}$, в августе – на $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Количество дней с $T \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ составило 36 дней. Из них количество дней с температурой в диапазоне ($23 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$) составило 4, в диапазоне ($24 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 23 \text{ }^\circ\text{C}$) – 4, в диапазоне ($25 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 24 \text{ }^\circ\text{C}$) – 6, в диапазоне ($26 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$) – 7, в диапазоне ($27 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 26 \text{ }^\circ\text{C}$) – 8, в диапазоне ($28 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 27 \text{ }^\circ\text{C}$) – 4, в диапазоне ($29 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 28 \text{ }^\circ\text{C}$) – 0, в диапазоне ($30 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 29 \text{ }^\circ\text{C}$) – 0, в диапазоне ($31 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) – 3.

За летний период средняя температура воды (t) составила $20,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 1) и превысила норму на $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$. В июне температура воды была ниже нормы $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$, а июле превышение нормы составило $2,9 \text{ }^\circ\text{C}$, в августе – $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Летом выделены 2 зоны температурного оптимума: первая наблюдалась 9 дней с 4 по 11 июля, а вторая наблюдалась 27 дней с 13 июля по 8 августа (рис. 4). Суммарная за лето продолжительность ЗТО составила 35 дней. Слабая интенсивность оптимума ($23 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$) наблюдалась 10 дней, средняя ($24 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 23 \text{ }^\circ\text{C}$) – 18 дней, сильная ($25 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 24 \text{ }^\circ\text{C}$) – 6 дней и очень сильная ($26 \text{ }^\circ\text{C} > t \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$) – 1 день (рис. 4).

2021 год. Летом средняя температура воздуха (T) составила $23,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 1) и превысила норму на $4,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная средняя месячная температура наблюдалась в июле и составила $24,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Превышение нормы для средней месячной температуре воздуха составило: в июне – на $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$, в июле – на $4,3 \text{ }^\circ\text{C}$, в августе – на $5,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Количество дней с $T \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ составило 64. Из них количество дней с температурой в диапазоне ($23 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$) составило 5, в диапазоне ($24 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 23 \text{ }^\circ\text{C}$) – 8, в диапазоне ($25 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 24 \text{ }^\circ\text{C}$) – 8, в диапазоне ($26 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$) – 8, в диапазоне ($27 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 26 \text{ }^\circ\text{C}$) – 10, в диапазоне ($28 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 27 \text{ }^\circ\text{C}$) – 5, в диапазоне ($29 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 28 \text{ }^\circ\text{C}$) – 12, в диапазоне ($30 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 29 \text{ }^\circ\text{C}$) – 3, в диапазоне ($31 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) – 2, в диапазоне ($32 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 31 \text{ }^\circ\text{C}$) – 2, в диапазоне ($33 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 32 \text{ }^\circ\text{C}$) – 1.

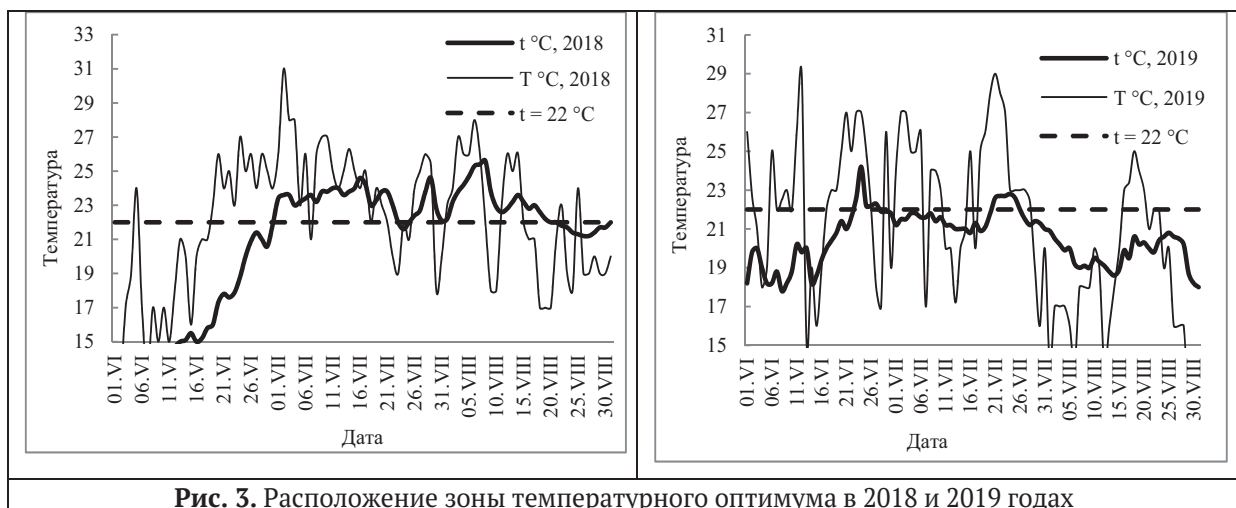


Рис. 3. Расположение зоны температурного оптимума в 2018 и 2019 годах

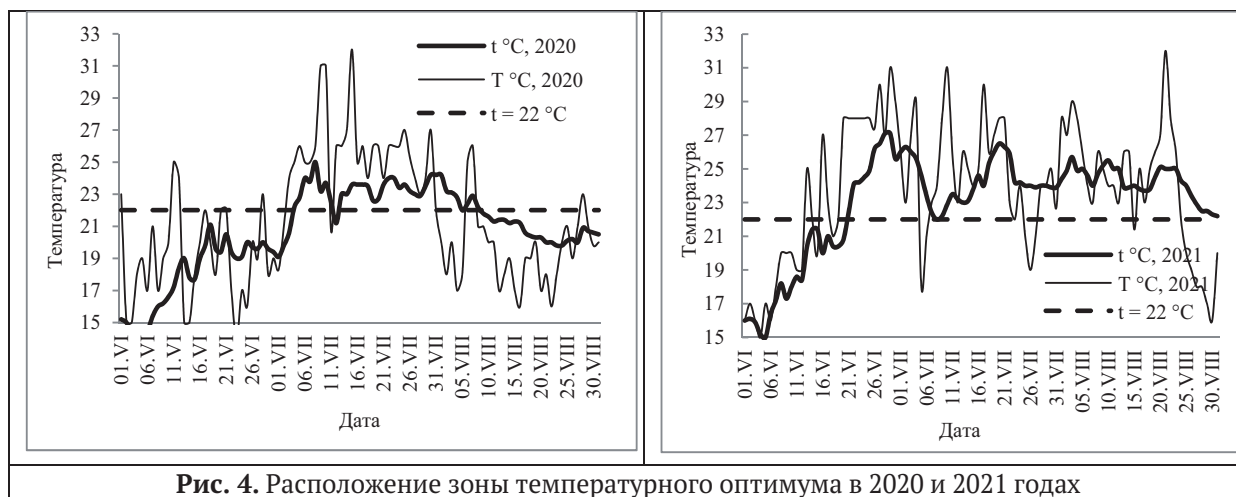


Рис. 4. Расположение зоны температурного оптимума в 2020 и 2021 годах

За летний период средняя температура воды (t) составила 23,1 °С (табл. 1) и превысила норму на 4,0 °С. Превышение нормы для средней месячной температуры воды составило: в июне на 4,1°С, в июле – на 3,8 °С, в августе – на 3,9 °С. В летней период выделены 2 зоны температурного оптимума. Первая зона оптимума продолжалась всего 17 дней и наблюдалась с 21 июня по 8 июля (рис. 4). Вторая продолжительная (55 день) зона оптимума наблюдалась с 9 июля по 1 сентября. Объединенная за летний период зона оптимума составила 72 дня. Слабая интенсивность оптимума (23 °С > t ≥ 22 °С) наблюдалась 10 дней, умеренная (24 °С > t ≥ 23 °С) – 15 дней, сильная (25 °С > t ≥ 24 °С) – 23 дня, очень сильная (26 °С > t ≥ 25 °С) – 24 дня и экстремальная (t ≥ 26 °С) – 7 дней.

Анализ данных наблюдений показал, зона температурного оптимума ежегодно в период 2016-2021 годов наблюдалась на Куйбышевском водохранилище, когда летняя температура поверхностного слоя воды устойчиво переходила через значение 22 °С. Однако, степень интенсивности, продолжительность, даты начала и окончания зоны температурного оптимума существенно изменялись и зависели, в основном, от температуры воздуха (табл. 2).

Средняя продолжительность температурного оптимума для процесса МРЦ за 2016-2021 годы составила 44 дня. Наибольшая продолжительность наблюдалась в 2021 году и составила

72 дня, а наименьшая – в 2019 году и составила всего 11 дней. Следовательно, самым благоприятным для процесса МРЦ является 2021 год, а самым неблагоприятным – 2019 год.

За дату начала температурного оптимума в среднем принимается 1 июля, а за дату окончания – 19 августа. Ранняя дата начала температурного оптимума приходится на 21 июня (2016 и 2021 годы), а поздняя дата – на 4 июля (2020 год). Ранняя дата окончания температурного оптимума приходится на 26 июля (2019 год), поздняя дата – на 1 сентября (2021 год).

По степени интенсивности температурного оптимума самым благоприятным для развития процесса МРЦ является 2021 год, в котором 15 дней характеризуются умеренной интенсивностью, 23 дня – сильной интенсивностью, 24 дня – очень сильной и 7 дней – экстремальной интенсивностью.

ВЫВОДЫ

Анализ совместных наблюдений за температурой воздуха и воды на Куйбышевском водохранилище в период 2016-2021 годов показал, что летняя температура воздуха в приземном слое атмосферы формирует зону температурного оптимума для процесса массового развития цианобактерий.

Зона температурного оптимума для МРЦ ежегодно наблюдалась на Куйбышевском водо-

Таблица 2. Параметры зоны температурного оптимума

Год	Границы ЗТО	Период ЗТО	Количество дней с разной интенсивностью				
			23 > t ≥ 22	24 > t ≥ 23	25 > t ≥ 24	26 > t ≥ 25	t ≥ 26
2016	21.VI - 01.IX	66	22	20	23	1	-
2017	29.VII - 28.VIII	27	22	5	-	-	-
2018	01.VII - 21.VIII	52	16	25	8	1	-
2019	23.VI - 26.VII	11	10	-	1	-	-
2020	04.VII - 8.VIII	35	10	18	6	1	-
2021	21.VI - 01.IX	72	10	15	23	24	7

хранилище. Такие параметры, как степень интенсивности, продолжительность, даты начала и окончания температурного оптимума существенно изменялись в период 2016-2021 годов и зависели от температуры воздуха.

По продолжительности и степени интенсивности температурного оптимума самым благоприятным для развития процесса МРЦ является 2021 год. Продолжительность зоны температурного оптимума составила 72 дня, из которых 10 дней характеризуются слабой интенсивностью, 15 дней – умеренной интенсивностью, 23 дня – сильной интенсивностью, 24 дня – очень сильной и 7 дней – экстремальной интенсивностью. Неблагоприятным для развития МРЦ является 2019 год. Продолжительность зоны температурного оптимума составила всего 11 дней, из которых 10 дней характеризуются слабой интенсивностью и 1 день сильной интенсивностью.

С ростом температуры увеличивается продолжительность и степень интенсивности зоны температурного оптимума. Следовательно, при дальнейшем росте температуры воздуха из-за глобального потепления климата зона температурного оптимума будет расширяться. Увеличение продолжительности и интенсивности температурного оптимума активизирует процесс массового развития цианобактерий, что негативно отразится на экологическом состоянии и качестве воды Куйбышевского водохранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусева, К.А. Цветение воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним / К.А. Гусева // Труды Всесоюзного гидробиологического общества. – 1952. – Т. 4. – С. 3-92.
2. Сиренко, Л.А. «Цветение» воды и эвтрофирование / Л.А. Сиренко, М.Я. Гавриленко. – Киев: Наук. думка, 1978. – 230 с.
3. Румянцев, В.А. Цианобактериальное «цветение» воды – источник проблем природопользования и стимул инноваций в России / В.А. Румянцев, Л.Н. Крюков, Ш.Р. Поздняков, А.В. Жуковский // Общество. Среда. Развитие. – 2011. – № 2. – С. 222.
4. Моисеенко, Т.И. Антропогенно-индуцированные процессы в биосфере / Т.И. Моисеенко // Вестник Российской академии наук. – 2011. – Т. 81. – № 12. – С. 1100-1108.
5. Ашихмина, Т.Я. Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоемов (литературный обзор) / Т.Я. Ашихмина, Т.И. Кутявина, Е.А. Домнина // Теоретические проблемы экологии. – 2014. – № 3. – С. 6-13.
6. Селезнева, А.В. Массовое развитие водорослей на водохранилищах р. Волги в условиях маловодья / А.В. Селезнева, В.А. Селезнев, К.В. Беспалова // Поволжский экологический журнал. – 2014. – № 1. – С. 88-96.
7. Никитин, О.В. Мониторинг цианобактериальных токсинов в водных объектах Республики Татарстан (2011-2016 гг.) / О.В. Никитин, В.З. Латыпова, Н.Ю. Степанова // В сборнике: Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водоемов. Материалы международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 51-62.
8. Сухаревич, В. И. Глобальное распространение цианобактерий: причины и последствия (обзор) / В.И. Сухаревич, Ю.М. Поляк // Биология внутренних вод. – 2020. – № 6. – С. 562-572.
9. Даценко, Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты / Ю.С. Даценко – М.: ГЕОС, 2007. – 252 с.
10. Селезнева, А.В. Формирование качества воды волжских водохранилищ при аномальных погодных условиях / А.В. Селезнева, К.В. Беспалова, В.А. Селезнев // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 5. – С. 4-14.
11. Лазарева, В.И. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона зообентоса / В.И. Лазарева, И.Э. Степанова, А.И. Цветков, Е. Г. Пряничникова, С. Н. Перова // Труды ИБВВ РАН. – 2018. – Вып. 81(84). – С. 47-84.
12. Seasonal and diel changes of dissolved oxygen in a hypertrophic prairie lake / R.D. Robarts, M.J. Waiser, M.T. Arts, M.S. Evans // Lakes and Reservoirs: Research and Management. 2005. V. 10. P. 167.
13. Cyanobacterial blooms modify food web structure and interactions in western Lake Erie / R.D. Briland, J.P. Stone, M. Manubolu M. et al. // Harmful Algae. 2020. V. 92. 101586.
14. Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow / Kosten S., Huszar V.L.M., Becares E. et al. // Glob. Change Biol. 2012. V. 18. P. 118.
15. Paerl H.W. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria // Water Res. 2012. V. 46. P. 1349.
16. Nontoxic strains of cyanobacteria are the result of major gene deletion events induced by a transposable element / G. Christiansen, C. Molitor, B. Philmus, R. Kurmayer // Mol. Biol. Evol. 2008. V. 25. P. 1695.
17. Dziallas, C. Increasing oxygen and water temperature select for toxic *Microcystis* sp. // PLoS ONE. 2011. V. 6. № 9. P. 1.
18. Литвинов, А.С. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении / А.С. Литвинов // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 9. – С. 91-96.
19. Селезнев, В.А. Антропогенное эвтрофирование крупных водохранилищ Нижней и Средней Волги в условиях глобального потепления климата (проблема и пути решения) / В.А. Селезнев, А.В. Селезнева, К.В. Беспалова // В сборнике: Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водоемов. Материалы международной научно-практической конференции. – 2017. – Казань. – С. 151-156.
20. Копылов, А.И. Сезонные и межгодовые колебания первичной продукции фитопланктона в Рыбинском водохранилище: влияние погодных и климатических изменений / А.И. Копылов, Т.С. Масленникова, Д.Б. Косолапов // Водные ресурсы. – 2019. – № 46(3). – С. 270-277.
21. Корнева, Л.Г. Многолетняя динамика и распределение фитопланктона крупных равнинных водохранилищ Европейской части РФ / Л.Г. Корнева, В.В. Соловьева, И.В. Митропольская, О.С. Макаро-

- ва, С.И. Сиделев // Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции: сборник тезисов докладов Всероссийской конференции, посвященной 65-летию ИБВВ имени И. Д. Папанина РАН. – 2021. Ярославль: Филигрань. – С. 102.
22. Климат Тольятти. Справочник специалиста [Под ред. Ц.А. Швер, Т.И. Боровкова]. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 208 с.
23. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. РСФСР. Выпуск 24. Бассейны рек Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. – Л.: Гидрометеоздат. 1985. – 520 с.

ZONE OF THE TEMPERATURE OPTIMUM OF CYANOBACTERIA IN THE KUIBYSHEV RESERVOIR

© 2023 K.V. Selezneva^{1,2}, A.V. Selezneva¹, V.A. Seleznev¹

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

² Togliatti State University, Tolyatti, Russia

Based on the results of hydrometeorological observations in the period 2016-2021, the parameters of the optimum temperature zone (TTO) for the process of mass development of cyanobacteria in the Kuibyshev reservoir were determined. Such parameters of the optimum zone as duration, intensity, upper and lower boundaries depend on the hydrometeorological conditions of a particular year. For the period 2016-2021, the average duration of the OST was 44 days, the longest - 72 days and was observed in 2021, and the shortest - 11 days and was observed in 2019. The highest intensity of OST was observed in 2021, when 10 days were characterized by low intensity, 15 days by moderate intensity, 23 days by strong intensity, 24 days by very strong intensity and 7 days by extreme intensity. The lowest intensity was observed in 2019, when 10 days were characterized by low intensity and 1 day by high intensity. The upper border of the WTO in 2021 was observed on June 21, and the lower border on September 1. In 2019, the upper limit was observed on June 23, and the lower limit on July 26. For the process of mass development of cyanobacteria, the most favorable year is 2021, and the unfavorable year is 2019. It was found that with the increase in air and water temperature, the duration and degree of intensity of the temperature optimum zone increased. Consequently, with a further increase in air temperature due to global warming, the duration and intensity of the optimum temperature zone will only increase, which will activate the process of mass development of cyanobacteria, which will negatively affect the ecological state and water quality of the Kuibyshev reservoir.

Key words: Kuibyshev reservoir, global warming, water temperature, cyanobacteria, optimum zone, interannual changes.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-5-155-163

EDN: YPPPHZ

REFERENCES

1. Guseva, K.A. Cvetenie vody, ego prichiny, prognoz i mery bor'by s nim / K.A. Guseva // Trudy Vsesoyuznogo gidrobiologicheskogo obshchestva. – 1952. – Т. 4. – С. 3-92.
2. Sirenko, L.A. «Cvetenie» vody i evtrofirovaniye / L.A. Sirenko, M.YA. Gavrilenko. – Kiev: Nauk. dumka, 1978. – 230 s.
3. Romyancev, V.A. Cianobakterial'noe "cvetenie" vody – istochnik problem prirodopol'zovaniya i stimul innovacij v Rossii / V.A. Romyancev, L.N. Kryukov, SH.R. Pozdnyakov, A.V. Zhukovskij // Obshchestvo. Sreda. Razvitie. – 2011. – № 2. – С. 222.
4. Moiseenko, T.I. Antropogенно-индуцированные процессы в биосфере / T.I. Moiseenko // Vestnik Rossijskoj akademii nauk. – 2011. – Т. 81. – № 12. – С. 1100-1108.
5. Ashihmina, T.Ya. Izuchenie processov evtrofikacii prirodnyh i iskusstvenno sozdannyh vodoyomov (literaturnyj obzor) / T.Ya. Ashihmina, T.I. Kutyavina, E.A. Domnina // Teoreticheskie problemy ekologii. – 2014. – № 3. – С. 6-15.
6. Selezneva, A.V. Massovoe razvitie vodoroslej na vodohranilishchah r. Volgi v usloviyah malovod'ya / A.V. Selezneva, V.A. Seleznev, K.V. Bespalova // Povolzhskij ekologicheskij zhurnal. – 2014. – № 1. – С. 88-96.
7. Nikitin, O.V. Monitoring cianobakterial'nyh toksinov v vodnyh ob'ektah Respubliki Tatarstan (2011-2016 gg.) / O.V. Nikitin, V.Z. Latypova, N.YU. Stepanova // V sbornike: Global'noe rasprostraneniye processov antropogennogo evtrofirovaniya vodoemov. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – 2017. – С. 51-62.
8. Suharevich, V.I. Global'noe rasprostraneniye cianobakterij: prichiny i posledstviya (obzor) / V.I. Suharevich, YU.M. Polyak // Biologiya vnutrennih vod. – 2020. – № 6. – С. 562-572.
9. Dacenko, Yu.S. Evtrofirovaniye vodohranilishch: gidrologo-gidrohimicheskie aspekty / YU.S. Dacenko – M.: GEOS, 2007. – 252 s.
10. Selezneva, A.V. Formirovaniye kachestva vody volzhskih vodohranilishch pri anomal'nyh pogodnyh usloviyah / A.V. Selezneva, K.V. Bespalova, V.A. Seleznev // Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye. – 2013. – № 5. – С. 4-14.
11. Lazareva, V.I. Kislородnyj rezhim vodohranilishch

- Volgi i Kamy v period potepleniya klimata: posledstviya dlya zooplanktona zoobentosa / V.I. Lazareva, I.E. Stepanova, A.I. Cvetkov, E. G. Pryanichnikova, S. N. Perova // Trudy IBVV RAN. – 2018. – Vyp. 81(84). – S. 47-84.
12. Seasonal and diel changes of dissolved oxygen in a hypertrophic prairie lake / R.D. Robarts, M.J. Waiser, M.T. Arts, M.S. Evans // Lakes and Reservoirs: Research and Management. 2005. V. 10. P. 167.
 13. Cyanobacterial blooms modify food web structure and interactions in western Lake Erie / R.D. Briland, J.P. Stone, M. Manubolu M. et al. // Harmful Algae. 2020. V. 92. 101586.
 14. Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow / Kosten S., Huszar V.L.M., Becares E. et al. // Glob. Change Biol. 2012. V. 18. P. 118.
 15. Paerl H.W. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria // Water Res. 2012. V. 46. P. 1349.
 16. Nontoxic strains of cyanobacteria are the result of major gene deletion events induced by a transposable element / G. Christiansen, C. Molitor, B. Philmus, R. Kurmayer // Mol. Biol. Evol. 2008. V. 25. P. 1695.
 17. Dziallas, C. Increasing oxygen and water temperature select for toxic *Microcystis* sp. // PLoS ONE. 2011. V. 6. № 9. P. 1.
 18. Litvinov, A.S. Termicheskiy rezhim Rybinskogo vodohranilishcha pri global'nom poteplenii / A.S. Litvinov // Meteorologiya i gidrologiya. – 2012. – № 9. – S. 91-96.
 19. Seleznev, V.A. Antropogennoe evtrofirovaniye krupnykh vodohranilishch Nizhnej i Srednej Volgi v usloviyakh global'nogo potepleniya klimata (problema i puti resheniya) / V.A. Seleznev, A.V. Selezneva, K.V. Bespalova // V sbornike: Global'noe rasprostraneniye processov antropogenogo evtrofirovaniya vodoemov. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – 2017. – Kazan'. – S. 151-156.
 20. Kopylov, A.I. Sezonnnye i mezhgodovyye kolebaniya pervichnoj produkcii fitoplanktona v Rybinskom vodohranilishche: vliyaniye pogodnykh i klimaticheskikh izmeneniy / A.I. Kopylov, T.S. Maslennikova, D.B. Kosolapov // Vodnye resursy. – 2019. – № 46(3). – S. 270-277.
 21. Korneva, L.G. Mnogoletnyaya dinamika i raspredeleniye fitoplanktona krupnykh ravninnykh vodohranilishch Evropejskoj chasti RF / L.G. Korneva, V.V. Solov'eva, I.V. Mitropol'skaya, O.S. Makarova, S.I. Sidelev // Biologiya vodnykh ekosistem v XXI veke: fakty, gipotezy, tendencii: sbornik tezisov dokladov Vserossijskoj konferencii, posvyashchennoj 65-letiyu IBVV imeni I. D. Papanina RAN. – 2021. YAroslavl': Filigran'. – S. 102.
 22. Klimat Tol'yatti. Spravochnik specialista [Pod red. C.A. SHver, T.I. Borovkova]. – L.: Gidrometeoizdat, 1987. – 208 s.
 23. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnykh vod sushi. Tom 1. RSFSR. Vypusk 24. Bassejny rek Volgi (srednee i nizhnee techeniye) i Urala. – L.: Gidrometeoizdat. 1985. – 520 s.

Ksenia Selezneva, Candidate of Chemical Sciences,
Researcher, Associate Professor.

E-mail: kvbespalova@yandex.ru

Alexandra Selezneva, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Senior Researcher.

E-mail: Aleks.selezneva@mail.ru

Vladimir Seleznev, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Chief Researcher. E-mail: seleznev53@mail.ru