



УДК 574.52 (282.247.416.1)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.57>

Влияние погодных условий на процесс массового развития цианобактерий в Куйбышевском водохранилище

А. В. Селезнева, В. А. Селезнев*

Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал Самарского ФИЦ РАН, г. Тольятти, Россия

Аннотация. По данным наблюдений в летний период 2016–2021 гг. рассмотрена межгодовая изменчивость погодных условий, температуры воды и содержания хлорофилла в Куйбышевском водохранилище. Регулярные наблюдения проводились в выходном створе водохранилища (Жигулевский гидроузел) в условиях полного перемешивания водных масс. Установлено, что основными факторами влияния на процесс массового развития цианобактерий (МРЦ) являются термический режим и погодные условия. С повышением температуры воды увеличиваются интервал и степень благоприятности жизнедеятельности цианобактерий. Отмечено, что за 6-летний период средний интервал составил 44 дня, степень благоприятности изменялась в широких пределах. Для процесса МРЦ наиболее благоприятными стали 2016 и 2021 гг., наименее благоприятными – 2017 и 2019 гг. В сезонном разрезе температурный оптимум ежегодно наблюдался в июле. Сделан вывод, что значительная вариабельность процесса МРЦ обусловлена синоптической цикличностью, сменой погодных условий. Установленное влияние термического режима и погодных условий на содержание хлорофилла позволяет предположить, что в условиях глобального потепления ожидается активизация процесса массового развития цианобактерий, что негативно отразится на экологическом состоянии и качестве воды Куйбышевского водохранилища.

Ключевые слова: Куйбышевское водохранилище, развитие цианобактерий, хлорофилл, термический режим, погодные условия, климат.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 1021060107175-5-1.6.19).

Для цитирования: Селезнева А. В., Селезнев В. А. Влияние погодных условий на процесс массового развития цианобактерий в Куйбышевском водохранилище // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 47. С. 57–76. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.57>

Original article

Influence of Weather Conditions on the Process of Mass Development of Cyanobacteria in the Kuibyshev Reservoir

A. V. Selezneva, V. A. Seleznev*

Institute of Ecology of the Volga Basin RAS – Branch of the Samara Federal Research Center RAS, Tolyatti, Russian Federation

Abstract. According to observation data in the summer period 2016-2021. The interannual variability of weather conditions, water temperature and chlorophyll (C_{chl}) content in the Kuibyshev Reservoir was considered. Regular observations were carried out at the outlet section of the reservoir (Zhigulevsky hydroelectric complex) under conditions of complete mixing of water masses. It has been established that the main factors influencing the process of mass development of cyanobacteria (MDC) are thermal regime and weather conditions. With increasing water temperature, the interval and degree of favorable activity of cyanobacteria increases. Over a 6-year period, the average interval was 44 days, the largest was 72 days, and the smallest was 11 days. The degree of favorability varied widely: from low ($23\text{ }^{\circ}\text{C} > t > 22\text{ }^{\circ}\text{C}$) to extreme high ($t > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$). The most favorable years for the MRC process were 2016 and 2021, when the C_{chl} content during the summer period was 6.2 and $7.2\text{ }\mu\text{g}/\text{dm}^3$, respectively. The least favorable years were 2017 and 2019, when the C_{chl} content during the summer period was 0.6 and $1.4\text{ }\mu\text{g}/\text{dm}^3$, respectively. Seasonally, the temperature optimum was observed annually in July. The C_{chl} content in July 2021 was $12.6\text{ }\mu\text{g}/\text{dm}^3$, and in the cold July 2017 – $0.7\text{ }\mu\text{g}/\text{dm}^3$. Significant variability of the MRC process is due to synoptic cyclicality and changing weather conditions. The established influence of thermal regime and weather conditions on the content of chlorophyll suggests that in conditions of global warming, the process of mass development of cyanobacteria is expected to intensify, which will negatively affect the ecological state and water quality of the Kuibyshev Reservoir.

Keywords: Kuibyshev reservoir, development of cyanobacteria, chlorophyll, thermal regime, weather conditions, climate.

For citation: Selezneva A.V., Seleznev V.A. Influence of Weather Conditions on the Process of Mass Development of Cyanobacteria in the Kuibyshev Reservoir. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 47, pp. 57-76. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.57> (in Russian)

Введение

МРЦ, или цианобактериальное «цветение» воды – это глобальный, многофакторный и динамичный процесс, характерный для поверхностных водоемов [Ашихмина, Кутявина, Домнина, 2014; Сухаревич, Поляк, 2020]. Наиболее наглядно процесс МРЦ проявляется в жаркие маловодные годы и оказывает негативное влияние на формирование качества воды [Dziallas, Grossart, 2011] и состояние водных биологических ресурсов [Seasonal and diel ... , 2005; Кислородный режим водохранилищ ... , 2018; Cyanobacterial blooms modify ... , 2020]. Водная масса водоемов приобретает неприятный запах и специфический цвет, увеличивается рН и содержание в воде органических веществ, трансформируется режим биогенных веществ и растворенного кислорода, возникает угроза токсического загрязнения, что приводит к ухудшению качества воды и появлению рисков при ее использовании для хозяйственно-питьевых нужд и рыбного хозяйства.

Изучение процесса МРЦ становится все более актуальным в условиях глобального потепления [Lakes as sentinels ... , 2009; Warmer climates boost ... , 2012; Paerl, Paul, 2012; Bertani, Primicerio, Rossetti, 2016; Long-term trends ... , 2016]. На водохранилищах Средней и Нижней Волги процесс МРЦ наблюдается практически ежегодно, за исключением холодных многоводных лет. В ближайшей перспективе проблема бактериального «цветения» воды будет только обостряться из-за климатической трансформации термического режима водохранилищ [Литвинов, Законнова, 2012; Копылов, Масленникова, Косолапов, 2019; Селезнева, Селезнева, Селезнев, 2023]. Очевидно, что рост абсолютных значений температуры воды и смещение экологических сезонов активизируют процесс МРЦ на водохранилищах.

Масштаб, продолжительность и интенсивность процесса МРЦ на водохранилищах Волги зависят от большого количества абиотических факторов [Даценко, Пуклаков, Эдельштейн ... , 2017; Абиотические факторы ... , 2022]. При существующем гидрологическом режиме и биогенной нагрузке главными факторами развития процесса МРЦ являются термический режим и погодные условия.

Настоящая статья посвящена исследованию закономерностей развития процесса МРЦ в годы с различными гидрометеорологическими условиями. В качестве объекта выбрано Куйбышевское водохранилище – самое крупное в Волжско-Камском каскаде. Для определения параметров зоны температурного оптимума (ЗТО) цианобактерий и оценки их влияния на биомассу цианобактерий (по содержанию хлорофилла «а») выбран период из шести лет (2016–2021 гг.), представляющих особый интерес из-за роста температуры приземного слоя атмосферного воздуха в Волжском бассейне. Полученные результаты по установлению связи между параметрами ЗТО и содержанием хлорофилла позволят разрабатывать более достоверные прогнозы МРЦ на водохранилище.

Объект, материалы и методы исследования

Куйбышевское водохранилище расположено в центральной части Волжского бассейна, характеризуется замедленным водным обменом. Общая длина 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.

Входным створом Куйбышевского водохранилища по волжской ветке является Чебоксарский гидроузел, по камской ветке – Нижнекамский, а замыкающим створом является Жигулевский гидроузел (рис. 1).

Изучение термического режима водохранилища проводится с момента его создания в 1957 г. Систематические измерения поверхностной температуры воды на гидрологических постах, равномерно расположенных по длине водоема (см. рис. 1), проводятся в прибрежной зоне водохранилища. Несмотря на значительную протяженность водохранилища, температура воды по длине водоема меняется незначительно. Анализ многолетних данных (1958–1980 гг.) показывает, что летом (июнь – август) в северной части водохранилища по волжской ветке (с. Вязовые) температура воды составляет 19,2 °С, а по камской ветке (с. Соколы Горы) – 18,9 °С (табл. 1). В южной части водохранилища (г. Тольятти) температура воды составляет 19,1 °С. По длине водохранилища разница температур составляет: в июне достигает 2,8 °С; в июле – 1,9 °С и в августе – 1,1 °С. Наибольший прогрев воды наблюдается в июле, когда средняя месячная температура воды составляет 20,5–21,1 °С.

Исследованию фитопланктона Куйбышевского водохранилища посвящено большое количество работ [Паутова, Номоконова, 2002; Попченко, 2001; Зеленевская, 2020; Содержание хлорофилла ... , 2022]. В жаркие и маловодные годы водохранилище характеризуется как эвтрофный водоем, а в холодные и многоводные годы – как мезотрофный водоем.



Рис. 1. Расположение гидрологических пунктов наблюдений (▽); гидроузлы: 1 – Чебоксарская ГЭС, 2 – Нижекамская ГЭС, 3 – Жигулевская ГЭС

Таблица 1

Средние значения температуры воды за летний период на пунктах в 1957–1980 гг., °С

Пункт наблюдений	Месяц			
	VI	VII	VIII	VI–VIII
Вязовые	17,0	21,0	19,7	19,2
Соколы Горы	16,6	20,8	19,2	18,9
Тетюши	17,4	21,1	19,9	19,5
Сенгилей	17,3	20,6	20,2	19,4
Димитровград	19,8	22,4	20,3	20,8
Тольятти	16,6	20,5	20,3	19,1

Как правило, в июне доминируют диатомовые водоросли, а июле и августе – сине-зеленые водоросли, или цианобактерии, благодаря которым на водохранилище практически ежегодно наблюдается процесс МРЦ. Однако если температура воды ниже 22 °С, то доминирование сине-зеленых водорослей в июле может не произойти и, наоборот, при температуре выше 22 °С в июне возможно доминирование цианобактерий. Для изучения динамики фитопланктона практикуется измерение хлорофилла «а» [Паутова, Номоконова, 2002].

Для оценки влияния гидрометеорологического режима на содержание хлорофилла использованы ежедневные данные гидрометеорологических наблюдений за температурой воздуха и воды в южной части водоема в период 2016–2021 гг. Наблюдения за температурой воздуха проводились на метеостанции г. Тольятти. Для анализа использовались значения на 08:00 ч (местное время).

Систематические наблюдения за поверхностной температурой воды проводились в прибрежной зоне водохранилища на приплотинном плесе. Измерения осуществлялись ежедневно в 08:00 ч поверхностным (родниковым) термометром в оправе Шпиндлера на глубине не менее 1 м. Цена деления термометра $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, следовательно, отсчет с термометра снимался с точностью до $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Регулярные наблюдения за содержанием хлорофилла (X_l) проводились в выходном створе водохранилища (Жигулевский гидроузел) в условиях полного перемешивания водных масс. Дискретность наблюдений – 10 раз в месяц. Выбор места наблюдений обусловлен тем, что пространственное распределение хлорофилла на акватории водохранилища крайне неоднородно, тогда как в замыкающем створе вода хорошо перемешивается и характеризует среднее содержание X_l в водной массе. Лабораторный анализ хлорофилла проводился в соответствии с действующими нормативными документами.

По данным ежедневных данных по температуре воздуха и воды для каждого года были определены параметры ЗТО для развития цианобактерий. В качестве критерия для определения параметров ЗТО выбрано значение температуры воды (t), равное $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой обычно начинается процесс МРЦ. Количество дней с температурой воды более $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ рассматривалось как биологический интервал ЗТО для цианобактерий. Количество дней с различной температурой воды характеризует степень благоприятности ЗТО. Степень благоприятности температурного фактора подразделяли следующим образом:

- слабая ($23\text{ }^{\circ}\text{C} > t > 22\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- умеренная ($24\text{ }^{\circ}\text{C} > t \geq 23\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- сильная ($25\text{ }^{\circ}\text{C} > t \geq 24\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- очень сильная ($26\text{ }^{\circ}\text{C} > t \geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- экстремальная ($t > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Результаты исследования и обсуждение

Для изучения влияния гидрометеорологического режима на динамику хлорофилла в летний период выполнен анализ межгодовых изменений следующих абиотических факторов: расход и уровень воды, содержание биогенных веществ (нитраты, фосфаты) и термический режим.

Расход воды. Данные об уровнях и расходах воды Куйбышевского водохранилища в створе Жигулевского гидроузла получены от филиала ПАО «РусГидро» – «Жигулевская ГЭС». Анализ расходов воды показал, что самым многоводным было лето 2017 г., когда средний расход составил $12\,021\text{ м}^3/\text{с}$ и существенно превысил норму ($7177\text{ м}^3/\text{с}$) за период 1958–

2022 г. Самым маловодным было лето 2021 г., когда средний расход составил 5681 м³/с. В период развития процесса МРЦ средний месячный расход воды (Q) в июле и августе 2016–2021 гг. изменялся незначительно в диапазоне 4981–7642 м³/с (табл. 2), за исключением июля 2017 г., когда Q составил 14 144 м³/с и превысил норму в 2 раза. Наименьший расход воды наблюдался в августе 2018 г. и составил 4981 м³/с.

Таблица 2

Средние значения расхода и уровня воды за летний период в 2016–2021 гг. по сравнению с нормой за период 1958–2022 гг.

Год	Месяц				Месяц			
	VI	VII	VIII	VI-VIII	VI	VII	VIII	VI-VIII
	Расход воды Q , м ³ /с				Уровень воды H , м БС			
2016	7437	5245	5077	5920	52,92	52,60	52,29	52,60
2017	13 779	14 144	8140	12 021	53,07	53,20	52,92	53,06
2018	10755	7642	4981	7793	53,02	52,93	52,48	52,81
2019	5667	5349	6905	5974	52,45	52,42	52,82	52,56
2020	13 245	6011	5788	8348	53,12	52,80	52,63	52,85
2021	6441	5262	5339	5681	52,92	52,62	51,86	52,47
Норма	8844	6649	6038	7177	52,59	52,64	52,26	52,50

Влияние расхода воды на развитие процесса МРЦ состоит в следующем: чем больше Q , тем меньше содержание X_L , чем меньше Q , тем больше содержание X_L . Однако влияние Q имеет значение только при температурах воды более 22 °С. В июле 2017 г. температура воды составила всего 20,0 °С, поэтому низкое содержание X_L в июле 2017 г. обусловлено не динамическим, а термическим фактором.

Уровень воды. Средний месячный уровень воды (H) в летний период 2016–2021 гг. изменялся в диапазоне 51,86–53,20 м (см. табл. 2). Самый высокий уровень воды был летом 2017 г., когда составил 53,06 м и превысил норму (52,50 м) за период 1958–2022 гг. Самый низкий уровень был летом 2021 г. и составил 52,47 м. Наименьший средний месячный уровень воды наблюдался в августе 2021 г. и составил 51,86 м, а наибольший – в июле 2017 г. и составил 53,20 м (см. табл. 2).

Влияние колебаний уровня воды на развитие процесса МРЦ качественно можно описать следующим образом: чем меньше H , тем больше содержание X_L , чем больше H , тем меньше содержание X_L . Так снижение H в августе 2021 г. возможно способствовало активизации процесса МРЦ. Однако доминирующим фактором является значительный рост температуры воды.

Биогенные вещества. Средняя месячная концентрация нитратов в летний период 2016–2021 гг. изменялась в диапазоне 0,14–0,54 мг/дм³ (табл. 3). Наибольшая средняя концентрация фиксировалась летом 2018 г. и составила 0,34 мг/дм³, а наименьшая – летом 2020 г. и составила 0,23 мг/дм³. Средняя месячная концентрация фосфатов в летний период 2016–2021 гг. изменялась в диапазоне 0,021–0,059 мг/дм³ (см. табл. 3). Наибольшая концентрация фиксировалась летом 2019 г. и составила 0,045 мг/дм³, а наименьшая – летом 2020 г. и составила 0,031 мг/дм³. При массовом развитии процесса МРЦ концентрация фосфатов летом на короткий период может снижаться до нуля

[Seleznev, Bespalova, Selezneva, 2018], как это было в августе 2010 г. В это время крайне низкая концентрация фосфатов выступает как лимитирующий фактор дальнейшего развития фитопланктона.

Таблица 3

Средняя концентрация биогенных веществ в летний период за 2016–2021 гг.

Год	Месяц				Месяц			
	VI	VII	VIII	VI–VIII	VI	VII	VIII	VI–VIII
	Нитраты, мгN/дм ³				Фосфаты, мгP/дм ³			
2016	0,37	0,21	0,35	0,31	0,039	0,034	0,055	0,043
2017	0,49	0,19	0,14	0,27	0,041	0,029	0,044	0,038
2018	0,54	0,32	0,16	0,34	0,031	0,021	0,053	0,035
2019	0,47	0,18	0,24	0,30	0,048	0,029	0,059	0,045
2020	0,39	0,16	0,14	0,23	0,036	0,022	0,034	0,031
2021	0,41	0,15	0,17	0,24	0,045	0,031	0,039	0,038

Термический режим. Анализ данных наблюдений за период 2016–2021 гг. показал (см. табл. 3), что средняя летняя T составляла 21,1–23,8 °С и была выше установленной для периода 1952–1979 гг. нормы на 2,0–4,7 °С [Селезнева, Селезнева, Селезнев, 2023]. Самым теплым оказался 2021 г., а холодным – 2017 г. Среди летних месяцев самым теплым был июль 2020 г., когда средняя месячная T составила 25,3 °С. Для августа самым теплым оказался 2016 г., когда средняя месячная T составила 24,1 °С.

Средняя летняя температура воды (t) за исследуемый период изменялась в пределах 19,2–23,1 °С и превысила норму, установленную для периода 1957–1980 гг., на 2,0–3,7 °С (табл. 4). Самым теплым был 2021 г., а холодным – 2017 год. Среди летних месяцев самыми теплыми были июль и август 2021 г., когда средняя месячная t достигла 24,3 и 24,2 °С соответственно.

Таблица 4

Средние значения температуры воздуха (T) и воды (t) в летний период 2016–2021 гг.

Год	Месяц				Месяц			
	VI	VII	VIII	VI–VIII	VI	VII	VIII	VI–VIII
	T , °С				t , °С			
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

По данным ежедневных данных по температуре воды для каждого года в период 2016–2021 гг. были определены параметры ЗТО благоприятные для развития цианобактерий. В качестве критерия выбрано значение температуры воды, равное 22 °С.

Летом 2016 г. средняя температура воздуха T составила 22,7 °С (см. табл. 4) и превысила норму на 3,6 °С. Наибольшая средняя месячная T 24,1 °С наблюдалась в августе. Превышение нормы составило: в июне – на

2,0 °С, в июле – на 3,3 °С, в августе – на 5,5 °С. Общее количество летних дней с T более 22 °С составило 60.

Кратковременные резкие колебания T обусловлены синоптической циклическостью (рис. 2). При прохождении антициклона устанавливается солнечная и штилевая погода и T существенно повышается. При температуре воды более 22 °С хорошо выражены три синоптических цикла с резким увеличением T . Первый цикл наблюдался в течение 6 дней с 13 по 19 июля. Наибольшая суточная T в цикле достигала 28,7 °С. Второй цикл наблюдался в течение 3 дней с 13 по 15 августа. Наибольшая суточная T в цикле достигала 30,1 °С. Третий цикл наблюдался в течение 6 дней с 19 по 24 августа. Наибольшая суточная T в цикле достигала 27,9 °С. Изменение T формирует ход температуры воды t .

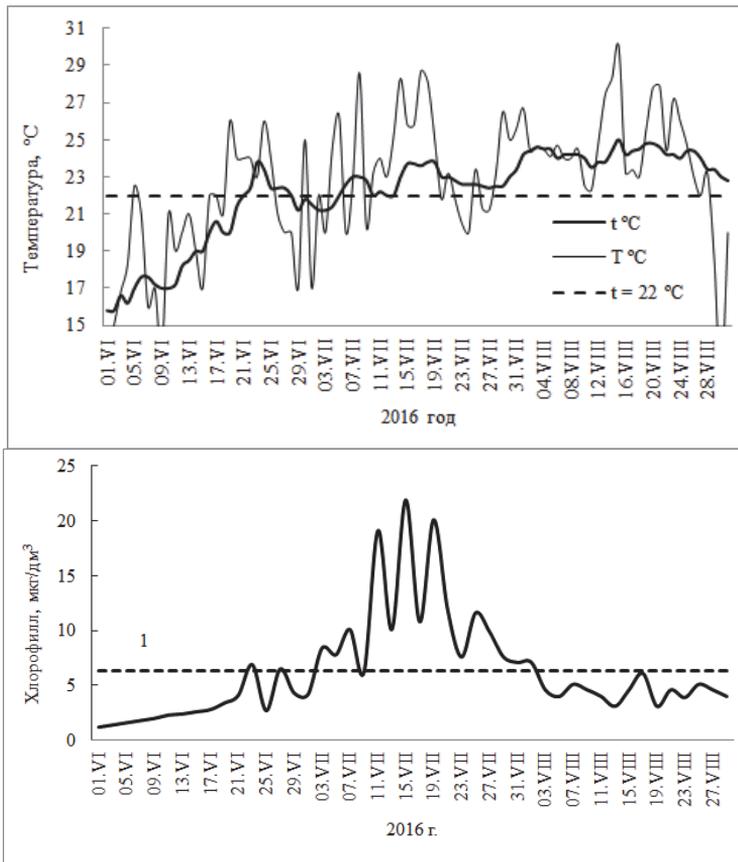


Рис. 2. Изменения T , t и X_l летом 2016 г. (1 – среднее значение X_l)

Средняя летняя t составила 22,1 °С (см. табл. 4) и превысила норму на 3,0 °С. Превышение нормы для средней месячной t составило: в июне – на 2,9 °С, в июле – на 2,1 °С, в августе – на 3,8 °С. В летний период выделено два биологических интервала, благоприятных для развития сине-зеленых

водорослей (цианобактерий), в течение которых наблюдался устойчивый переход температуры воды через 22 °С. Первый интервал продолжался 8 дней (с 21 по 28 июня), второй – 58 дней (с 5 июля по 1 сентября) (см. рис. 2). Общая продолжительность биологических интервалов за лето составила 66 дней. Из них 22 дня характеризовались слабой степенью благоприятности жизнедеятельности, 20 дней – умеренной, 23 дня – сильной и 1 день – очень сильной степенью.

Ход температуры воды и синоптическая изменчивость погодных условий отражаются на процессе МРЦ. Среднее содержание X_t за летний период 2016 г. составило 6,3 мкг/дм³: в июне – 3,1 мкг/дм³, в июле – 10,9 мкг/дм³, в августе – 4,6 мкг/дм³. В июле содержание X_t наибольшее и характеризуется значительной вариабельностью, что обусловлено высокими значениями T и t , а также синоптической изменчивостью погодных условий. При ясной и штилевой погоде в период антициклонической деятельности содержание X_t резко возрастает, и наблюдаются пики «цветения» воды. Наибольшее содержание X_t наблюдалось 17 июля и составило 21,9 мкг/дм³ при температуре воды в 29,1 °С (см. рис. 2).

Летом 2017 г. средняя температура воздуха T составила 21,1 °С (табл. 4) и превысила норму на 2,0 °С. Наибольшая средняя месячная T 22,6 °С наблюдалась в августе. Превышение нормы для средней месячной T составило: в июне – на 0,2 °С, в июле – на 1,9 °С, в августе – на 4,0 °С. Общее количество летних дней с $T \geq 22$ °С составило 40.

Летний период включает два синоптических цикла T при температуре воды более 22 °С. Первый цикл наблюдался в течение 6 дней (с 29 июля по 3 августа). Наибольшая T в цикле достигала 29,1 °С. Второй цикл наблюдался в течение 3 дней (с 23 по 25 августа). Наибольшая T в цикле достигала 28,1 °С.

За летний период средняя t составила 19,2 °С (см. табл. 4) и превысила норму всего на 0,1 °С. Средняя месячная t была ниже нормы: в июне – на 1,4 °С, в июле – на 0,5 °С, а в августе выше нормы на 2,0 °С. Устойчивый переход температуры воды через 22 °С произошел поздно – 29 июля. С конца июля и в августе наблюдались два биологических интервала, благоприятных для развития цианобактерий. Первый продолжался 17 дней (с 29 июля по 14 августа), второй – 9 дней (с 20 по 28 августа). Общая продолжительность биологических интервалов составила 26 дней. Из них 21 день характеризовался слабой степенью благоприятности и 5 дней – умеренной степенью.

В 2017 г. процесс МРЦ не получил своего развития. Из-за низких температур воды все лето содержание X_t было крайне низким и составило 0,7 мкг/дм³. Среднее содержание X_t в июне составило 0,4 мкг/дм³, в июле – 0,7 мкг/дм³ и в августе – 0,8 мкг/дм³.

Летом 2018 г. средняя T составила 22,1 °С (см. табл. 4) и превысила норму на 3,0 °С. Наибольшая средняя месячная T наблюдалась в июле (24,2 °С). Превышение нормы составило: в июне – на 2,0 °С, в июле – на 3,9 °С, в августе – на 3,1 °С. Общее количество летних дней с $T \geq 22$ °С составило 52 (рис. 3).

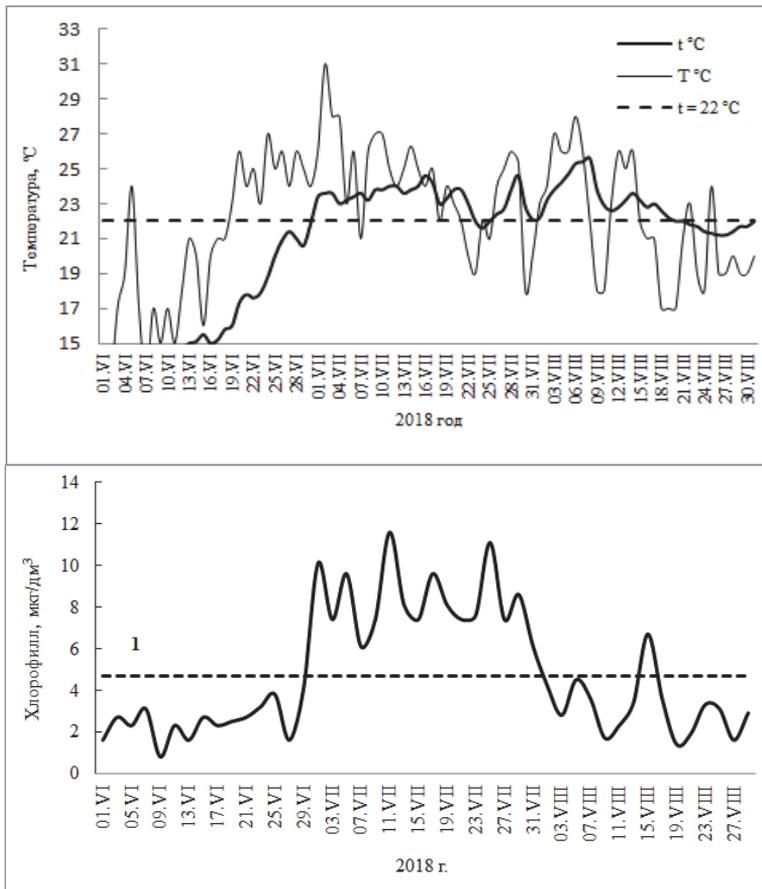


Рис. 3. Изменения T , t и X_l летом 2018 г. (1 – среднее значение X_l)

Летний период включает пять синоптических циклов T при температуре воды более 22 °С (см. рис. 3). Первый цикл наблюдался 4 дня (с 1 по 4 июля) с наибольшей T 31,2 °С. Второй цикл – 12 дней (с 8 по 19 июля) с наибольшей T 27,3 °С. Третий цикл – 4 дня (с 26 по 29 июля) с наибольшей T 26,1 °С. Четвертый цикл – 7 дней (с 1 по 7 августа) с наибольшей T 28,2 °С. Пятый цикл – 4 дня (с 11 по 14 августа) с наибольшей T 26,1 °С (см. рис. 3). Изменение T коррелирует с ходом температуры воды t .

За летний период средняя t составила 20,8 °С (см. табл. 4) и превысила норму на 1,7 °С. В июне t была ниже нормы на 0,4 °С, в июле – выше нормы на 2,9 °С, в августе – на 2,5 °С (см. рис. 3). Летом выделены 2 биологических интервала. Первый наблюдался 23 дня (с 1 по 23 июня), второй – 28 дней (с 25 июля по 21 августа). Общая продолжительность биологических интервалов за лето составила 52 дня. Слабая степень благоприятности наблюдалась 27 дней, умеренная – 16 дней, сильная – 28 дней, очень сильная – 1 день.

Ход t и синоптическая цикличность T находят отражение в формировании вариабельности X_l (см. рис. 3). Среднее содержание X_l в летний период

2018 г. составило $4,7 \text{ мкг/дм}^3$. Среднее содержание X_n в июне составило $2,5 \text{ мкг/дм}^3$, в июле – $8,4 \text{ мкг/дм}^3$ и в августе – $3,1 \text{ мкг/дм}^3$. Максимальное содержание X_n $11,6 \text{ мкг/дм}^3$ наблюдалось 11 июля при температуре воды в $24,2 \text{ }^\circ\text{C}$, ясной и штилевой погоде.

Летом 2019 г. средняя T составила $21,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. табл. 4) и превысила норму на $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Наибольшая средняя месячная T $23,1 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдалась в июле. 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 $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Общее количество летних дней с $T \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ составило 48.

Кратковременные резкие колебания T обусловлены синоптической цикличностью. Амплитуда колебаний T составляет $10\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$. При температуре $\geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ выражены два синоптических цикла T . Первый цикл T наблюдался в течение 8 дней (с 18 по 25 июня). Наибольшая T в цикле достигала $27,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Второй цикл наблюдался в течение 6 дней (с 18 по 23 августа). Наибольшая T в цикле достигала $29,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ход T тесно связан с ходом t . За летний период средняя t составила $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. табл. 4) и превысила норму на $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Превышение нормы 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 биологических интервала. Первый наблюдался 5 дней (с 23 по 27 июня), второй – 6 дней (с 21 по 26 июля). Общая продолжительность биологических интервалов за лето составила 11 дней. Слабая степень благоприятности наблюдалась 10 дней, умеренная отсутствовала, сильная – 1 день.

Среднее содержание X_n за летний период 2019 г. составило $1,8 \text{ мкг/дм}^3$. В июне – $1,9 \text{ мкг/дм}^3$, в июле – $2,9 \text{ мкг/дм}^3$, в августе – $0,4 \text{ мкг/дм}^3$. Максимальное содержание X_n $4,6 \text{ мкг/дм}^3$ наблюдалось 21 июля при температуре воды $22,6 \text{ }^\circ\text{C}$ и воздуха $29,2 \text{ }^\circ\text{C}$, ясной и штилевой погоде. В августе T резко уменьшилась до $14,6 \text{ }^\circ\text{C}$, температура воды уменьшилась до $19,2 \text{ }^\circ\text{C}$, что обусловило снижение содержания X_n до $1,2 \text{ мкг/дм}^3$.

Летом 2020 г. средняя T составила $21,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. табл. 4) и превысила норму на $2,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Наибольшая T $25,3 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдалась в июле. Превышение нормы составило: в июне – на $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, в июле – на $5,0 \text{ }^\circ\text{C}$, в августе – на $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Общее количество летних дней с $T \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ составило 36.

Летний период включает четыре синоптических цикла T при температуре воды более $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Первый цикл наблюдался 8 дней (с 3 по 10 июля). Наибольшая T в цикле достигала $31,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Второй цикл наблюдался 16 дней (с 12 по 27 июля). Наибольшая T в цикле достигала $32,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Третий цикл наблюдался 2 дня с 29 по 30 июля. Наибольшая T в цикле достигала $27,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Четвертый цикл наблюдался 2 дня с 6 по 07 августа. Наибольшая T в цикле достигала $26,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 4).

За летний период средняя t составила $20,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. табл. 4) и превысила норму на $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$. В июне t была ниже нормы $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$, в июле выше нормы на $2,9 \text{ }^\circ\text{C}$, в августе – на $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Летом выделены два биологических интервала. Первый наблюдался 9 дней (с 4 по 11 июля), второй – 27 дней (с 13 июля по 8 августа) (см. рис. 4). Общая продолжительность биологических интервалов за лето составила 35 дней. Слабая степень благоприятности наблюдалась 10 дней, умеренная – 18 дней, сильная – 6 дней, очень сильная – 1 день (см. рис. 4).

Среднее содержание X_l в летний период 2020 г. составило 4,6 мкг/дм³. В июне – 3,9 мкг/дм³, в июле – 9,3 мкг/дм³, в августе – 0,4 мкг/дм³. Максимальное содержание X_l 12,3 мкг/дм³ наблюдалось 15 июля при температуре воды 23,6 °С и воздуха 32,3 °С, ясной и штилевой погоде (см. рис. 4). После 5 августа T снизилась и 15 августа составила 15,2 °С, t уменьшилась до 21,3 °С, что обусловило резкое снижение содержания X_l до менее 1,0 мкг/дм³.

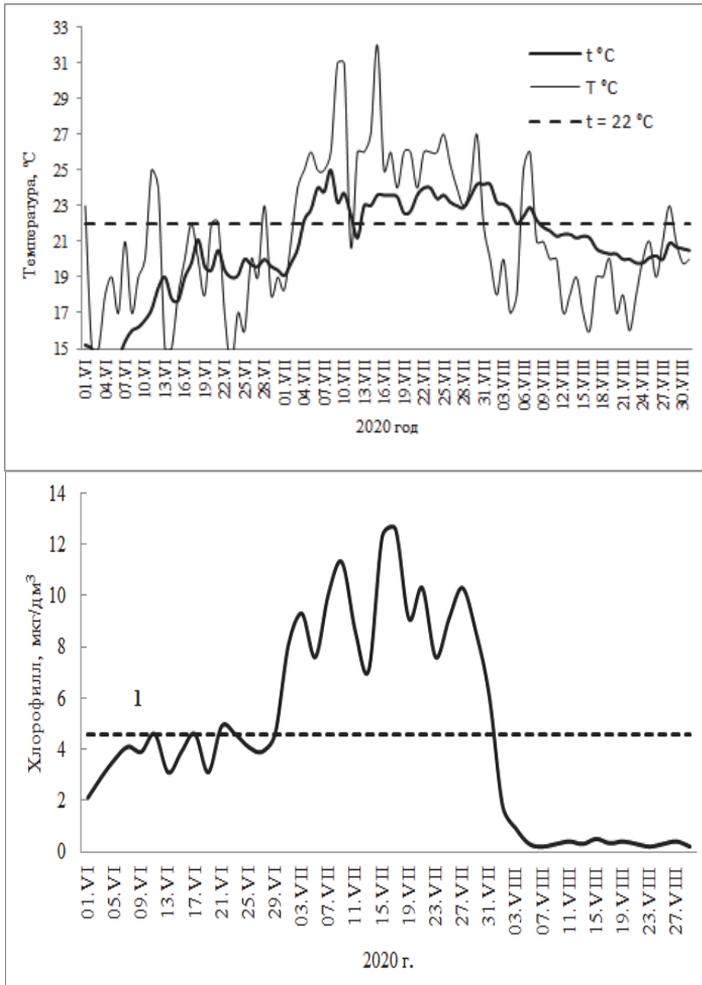


Рис. 4. Изменения T , t и X_l летом 2020 г. (1 – среднее значение X_l)

Летом 2021 г. средняя T составила 23,8 °С (табл. 4) и превысила норму на 4,7 °С. Наибольшая средняя месячная T 24,6 °С наблюдалась в июле. Превышение нормы составило: в июне – на 4,5 °С, в июле – на 4,3 °С, в августе – на 5,3 °С. Общее количество летних дней с $T \geq 22$ °С составило 64.

Обращает на себя внимание синоптическая цикличность T . Летний период включает пять циклов T при температуре воды более 22°C . Первый цикл наблюдался 15 дней (с 20 июня по 4 июля). Наибольшая T в цикле достигала $31,2^{\circ}\text{C}$. Второй цикл наблюдался 5 дней (с 7 по 11 июля). Наибольшая T в цикле достигала $28,3^{\circ}\text{C}$. Третий цикл наблюдался 12 дней (с 13 по 24 июля). Наибольшая T в цикле достигала $30,4^{\circ}\text{C}$. Четвертый цикл наблюдался 10 дней (с 28 июля по 5 августа). Наибольшая T в цикле достигала $29,2^{\circ}\text{C}$. Пятый цикл наблюдался 8 дней (с 16 по 23 августа). Наибольшая T в цикле достигала $32,2^{\circ}\text{C}$ (рис. 5). Изменение T согласуется с ходом t . Синоптическая цикличность температуры воздуха (как правило, это ясно и штиль) находит отражение в формировании «пиков цветения» воды (см. рис. 5).

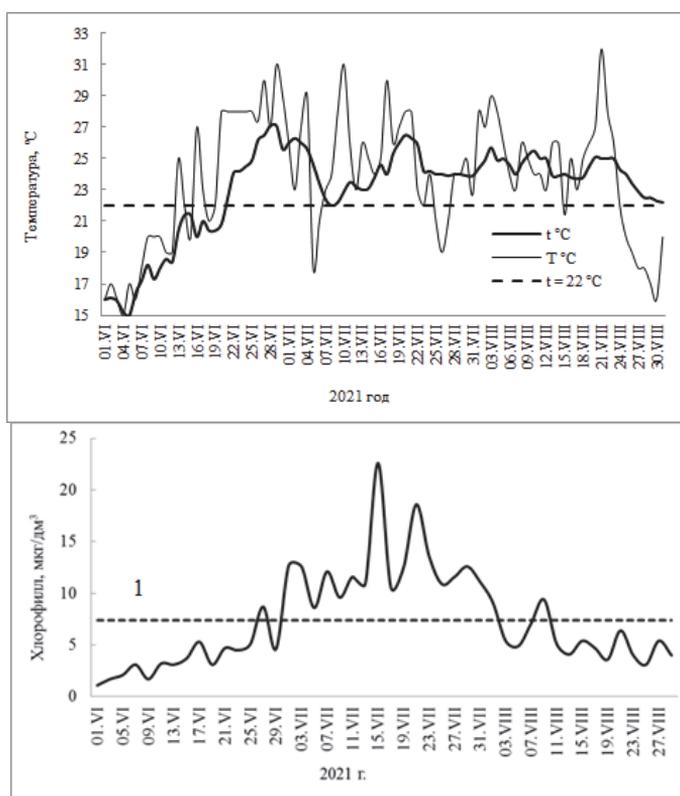


Рис. 5. Изменения T , t и X_t летом 2021 г. (1 – среднее значение Хл)

За летний период средняя t составила $23,1^{\circ}\text{C}$ (см. табл. 4) и превысила норму на $4,0^{\circ}\text{C}$. Превышение нормы составило: в июне – на $4,1^{\circ}\text{C}$, в июле – на $3,8^{\circ}\text{C}$, в августе – на $3,9^{\circ}\text{C}$. В летний период выделены два биологических интервала. Первый интервал продолжался 17 дней (с 21 июня по 8 июля), второй интервал – 55 дней (с 9 июля по 1 сентября) (рис. 7). Общая продолжительность биологических интервалов за лето составила 72 дня. Слабая степень благоприятности наблюдалась 10 дней, умеренная – 15 дней, сильная – 23 дня, очень сильная – 24 дня и экстремальная – 7 дней.

Среднее содержание X_L в летний период 2021 г. составило 7,4 мкг/дм³. В июне – 3,7 мкг/дм³, в июле – 12,6 мкг/дм³, в августе – 5,4 мкг/дм³. Наибольшее содержание X_L 22,6 мкг/дм³ наблюдалось 15 июля при температуре воды 24,6 °С и воздуха 30,1 °С, ясной и штилевой погоде. Только после 24 августа T резко снизилась и составила 15,2 °С к 30 августа, вплоть до 1 сентября оставалась больше 22,0 °С. Поэтому содержание X_L весь август сохранялось высоким и изменялось в пределах 3,1–9,4 мкг/дм³ при среднем значении 5,4 мкг/дм³. Вариабельность содержания X_L особенно проявляется в июле и обусловлена синоптическими условиями, сменой циклонической и антициклонической деятельности в атмосфере. При антициклоне устанавливается солнечная и штилевая погода, которая создает благоприятные условия для бурного развития цианобактерий.

Сравнительный анализ полученных результатов наблюдений в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища в период 2016–2021 гг. за абиотическими факторами и хлорофиллом показал, что параметры ЗТО существенно отличаются друг от друга в разные годы (табл. 5). За период исследований (2016–2021 гг.) средняя продолжительность биологического интервала составила 44 дня, а степень благоприятности изменялась от слабой до экстремальной.

Таблица 5

Границы начала и окончания, биологический интервал (L) и степень благоприятности (S)

Год	Границы ЗТО	t_{cp} , °С	$t_{макс.}$, °С	$t_{мин.}$, °С	L , дни	Степень благоприятности, дни				
						23 °С > $t \geq$ 22 °С	24 °С > $t \geq$ 23 °С	25 °С > $t \geq$ 24 °С	26 °С > $t \geq$ 25 °С	$t \geq$ 26 °С
2016	21.06–01.09	22,1	24,1	19,5	66	22	20	23	1	–
2017	29.07–28.08	19,2	22,3	15,2	27	22	5	–	–	–
2018	01.07–21.08	20,8	23,4	16,2	52	16	25	8	1	–
2019	23.06–26.07	20,5	21,6	19,7	11	10	–	1	–	–
2020	04.07–8.08	20,7	23,0	17,9	35	10	18	6	1	–
2021	21.06–01.09	23,1	24,3	20,7	72	10	15	23	24	7

Наиболее благоприятным для развития цианобактерий оказался 2021 г. со средней летней температурой (t_{cp}) 23,1 °С. Уже в июне средняя месячная t составляла 20,7 °С, а в июле и августе достигала 24,3 °С и 24,13 °С, соответственно. В начале лета переход температуры воды через 22 °С начался рано – 21 июня, а обратный переход поздно – 1 сентября. В этот год наблюдались самый продолжительный биологический интервал 72 дня и экстремальная степень благоприятности жизнедеятельности ($t \geq 26$ °С), которая составила 7 дней.

Совместные наблюдения на постоянной станции в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища в период 2016–2021 гг. за абиотическими факторами и хлорофиллом позволяют оценить роль гидрометеорологических условий в развитии фитопланктона. С ростом температуры воды содержание хлорофилла увеличивается, а с падением температуры – уменьшается. Жарким летом 2021 г. наблюдалось наибольшее содержание хлорофилла (3,7–12,6 мкг/дм³), холодным летом 2017 г. – наименьшее (0,4–0,7 мкг/дм³).

Наименее благоприятным для развития цианобактерий был 2017 г. со средней летней температурой (t_{cp}) 19,2 °С. В июне средняя месячная t составляла всего 15,2 °С, в июле – 20,0 °С и только в августе она составила 22,3 °С. Переход температуры воды через 22 °С состоялся только 29 июля, а обратный переход – 28 августа. В этот год наблюдались относительно короткий биологический интервал 27 дней. Из них 22 дня наблюдалась слабая и 5 дней умеренная степени благоприятности.

Между параметрами ЗТО и содержанием X_t существует зависимость: чем больше биологический интервал (L) и степень благоприятности (S), тем больше содержание X_t . В 2021, 2016 гг., благоприятных для развития цианобактерий, наблюдались самые большие средние летние концентрации X_t и составили 7,4 и 6,3 мкг/дм³ соответственно (табл. 6). В сезонном разрезе наибольшие средние месячные концентрации X_t наблюдались в июле этих лет и составили 12,6 и 10,9 мкг/дм³. Максимальные суточные концентрации X_t составили 22,6 и 21,9 мкг/дм³. Самые маленькие средние летние концентрации X_t наблюдались в 2017 и 2019 гг. и составили от 1,9 и 4,6 мкг/дм³.

В сезонном разрезе наибольшие средние месячные концентрации X_t наблюдались в июле 2016 и 2021 гг. и составили 10,9 и 12,6 мкг/дм³. Максимальные суточные значения X_t наблюдались также в июле 2016 и 2021 гг. и составили 21,9 и 22,6 мкг/дм³. Наибольшая вариабельность содержания X_t наблюдалась в летний период 2016 и 2021 гг. Среднее квадратичное отклонение концентрации хлорофилла ($\delta_{хл}$) в июле 2016 г. и 2021 г. составило 5,1 и 3,4 мкг/дм³.

Таблица 6

Среднее и максимальное значения концентрации X_t в летний период 2016–2021 гг., мкг/дм³

Год	VI		VII		VIII		VI–VIII	
	среднее	макс.	среднее	макс.	среднее	макс.	среднее	макс.
2016	3,1	6,9	10,9	21,9	4,6	7,1	6,3	21,9
2017	0,4	0,7	0,7	1,4	0,8	1,9	0,7	1,9
2018	2,5	4,1	8,4	11,6	3,1	6,7	4,7	11,6
2019	1,9	3,6	2,9	4,6	0,4	0,7	1,8	4,6
2020	3,9	4,9	9,3	12,3	0,4	0,7	4,6	12,3
2021	3,7	8,7	12,6	22,6	5,4	9,4	7,4	22,6

Полученные результаты показывают, что на развитие цианобактерий существенное влияние оказывают абсолютные значения температуры и их продолжительность. Есть основания предполагать, что оценивая параметры ЗТО или прогнозируя их по метеорологическим данным, вполне возможно предвидеть развитие процесса МРЦ. Чем продолжительнее биологический интервал, тем продолжительнее процесс МРЦ. Чем выше степень благоприятности, тем выше интенсивность процесса МРЦ.

Дополнительным фактором, создающим крайне благоприятные условия для развития цианобактерий, является ясная и штилевая погода, при которой концентрация X_t резко увеличивается. В июле 2021 и 2016 гг. вариабельность содержания X_t весьма существенна и среднее квадратичное отклонение составляет 3,4 и 5,1 мкг/дм³ соответственно.

Регулярные наблюдения в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища в летний период 2016–2021 гг. за абиотическими факторами и хлорофиллом позволяют оценить значительное влияние температурных и погодных условий на динамику хлорофилла и развитие летнего фитопланктона, прежде всего цианобактерий. С ростом температуры воды содержание хлорофилла увеличивается (особенно после 22 °С), когда в фитопланктоне доминируют цианобактерии. Резкие колебания хлорофилла в июле и августе обусловлены погодными условиями. В период прохождения антициклона наблюдается солнечная и безветренная погода, которая способствует бурному развитию цианобактерий. Наблюдаемое повышение температуры воды – это важнейший фактор, способствующий распространению и доминированию цианобактерий в водохранилищах Средней и Нижней Волги.

Значимость полученных результатов в условиях глобального изменения климата возрастает, так как установлено, что содержание X_t и массовое развитие цианобактерий зависят от термического режима и погодных условий. Одним из важнейших показателей глобального потепления является региональный тренд на повышение температуры воздуха на Средней и Нижней Волге. Начиная с 1970-х гг. каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего. В последние годы (2015–2021 гг.) потепление происходит наиболее интенсивно, особенно в июле в период МРЦ. Повышение температуры воздуха обуславливает климатическую трансформацию термического режима Куйбышевского водохранилища, наметилась устойчивая тенденция повышения температуры воды и увеличение продолжительности теплого периода [Селезнева, Селезнева, Селезнев, 2023]. Изменение термического режима водохранилищ Волги подтверждается и другими исследователями [Литвинов, Законнова, 2012; Копылов, Масленникова, Косолапов, 2019].

Существует большое количество исследований, направленных на оценку влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона. Не вызывает сомнений, что наряду с термическим режимом воздействие оказывают такие факторы, как динамика водных масс (расход и уровень воды) и содержание биогенных веществ (нитраты и фосфаты). Однако лимитирующим фактором развития фитопланктона летом 2017 г. стала низкая температура воды, которая в среднем за летний период составила 19,2 °С. В этот год процесс МРЦ не развился, что и привело к низкому содержанию хлорофилла.

В условиях глобального потепления и повышения летней температуры воды Куйбышевского водохранилища возникает проблема оценки и прогнозирования процесса МРЦ при различных сценариях климатических изменений и биогенной нагрузки. Для повышения достоверности разрабатываемых прогнозов процесса МРЦ необходима организация детальных комплексных наблюдений, включающих широкий спектр абиотических и биотических показателей, при различных синоптических условиях.

Выводы

Анализ совместных наблюдений за абиотическими факторами и содержанием хлорофилла на Куйбышевском водохранилище в летний период 2016–2021 гг. показал, что термический режим водохранилища и погодные условия являются ведущими факторами образования и функционирования процесса МРЦ. При существующем режиме регулирования водного стока в летний период влияние гидродинамических условий (расход и уровень воды) на процесс МРЦ следует рассматривать как второстепенный абиотический фактор, не оказывающий существенного воздействия на развитие цианобактерий. Содержание фосфатов может выступить лимитирующим фактором при снижении концентрации до нуля, что возможно в жаркие маловодные годы.

Термический режим формирует зону температурного оптимума для цианобактерий. С повышением температуры воды увеличивается биологический интервал и степень благоприятности ЗТО. За 6-летний период наблюдений средний биологический интервал составил 44 дня, наибольший – 72 дня, а наименьший – 11 дней. Степень благоприятности изменялась в широких пределах: от низкой ($23\text{ }^{\circ}\text{C} > t > 22\text{ }^{\circ}\text{C}$) до экстремальной ($t > 26\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для процесса МРЦ наиболее благоприятными стали 2016 и 2021 гг., когда содержание хлорофилла за летний период составило 6,2 и 7,2 мкг/дм³, соответственно. Наименее благоприятными стали 2017 и 2019 г., когда содержание хлорофилла за летний период составило 0,6 и 1,4 мкг/дм³ соответственно. В сезонном разрезе пик температурного оптимума ежегодно наблюдался в июле. Среднее содержание хлорофилла в июле 2021 г. составило 12,6 мкг/дм³, а в холодном июле 2017 г. – 0,7 мкг/дм³.

Значительная вариабельность процесса МРЦ обусловлена синоптической цикличностью, сменой погодных условий. При прохождении антициклона и установлении солнечной и безветренной погоды содержание хлорофилла резко увеличивается, а при прохождении циклона и установлении пасмурной и ветреной погоды резко уменьшается. При солнечной и штилевой погоде в июле 2021 г. максимальное содержание хлорофилла X_t составило 21,9 мкг/дм³ при температуре воды в 29,1 °С, а в июле 2016 г. – 22,6 мкг/дм³ при температуре воды 24,6 °С.

Установленное влияние термического режима и погодных условий на содержание хлорофилла позволяет предположить, что при дальнейшем росте температуры воздуха из-за глобального потепления биологический интервал ЗТО будет увеличиваться, а степень благоприятности повышаться. Изменение параметров ЗТО в этом направлении будет активизировать процесс МРЦ, что негативно отразится на экологическом состоянии и качестве воды Куйбышевского водохранилища. Продолжение исследований процесса МРЦ позволит получить количественные связи между параметрами ЗТО и атмосферными процессами и повысить достоверность его прогнозов при различных сценариях изменения климата и биогенной нагрузки на водохранилище.

Список литературы

Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона Волги. Водохранилища средней Волги / Н. М. Минеева, С. А. Поддубный, И. Э. Степанова, А. И. Цветков // Биология внутр. вод. 2022. № 6. С. 640. <http://doi.org/10.31857/S0320965222060158>

Ашихмина Т. Я., Кутявина Т. И., Домнина Е. А. Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоемов (литературный обзор) // Теоретические проблемы экологии. 2014. № 3. С. 6–13.

Даценко Ю. С., Пуклаков В. В., Эдельштейн К. К. Анализ влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона в малопроточном стратифицированном водохранилище // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 73–85.

Зеленевская Н. А. Особенности развития фитопланктона Саратовского водохранилища в 2019 году // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики : материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. Тольятти : Волж. ун-т им. В.Н. Татищева, 2020. Т. 2. С. 230.

Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона зообентоса / В. И. Лазарева, И. Э. Степанова, А. И. Цветков [и др.] // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 47–84. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0005>

Копылов А. И., Масленникова Т. С., Косолапов Д. Б. Сезонные и межгодовые колебания первичной продукции фитопланктона в Рыбинском водохранилище: влияние погодных и климатических изменений // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 3. С. 270–277. <http://www.doi.org/10.31857/S0321-0596463270-277>

Литвинов А. С., Законнова А. В. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 91–96.

Паутова В. Н., Номоконова В. И. Динамика содержания хлорофилла «а» в фитопланктоне Куйбышевского водохранилища // Гидробиологический журнал. 2002. Т. 38, № 6. С. 3–9.

Попченко И. И. Видовой состав и динамика фитопланктона Саратовского водохранилища. Тольятти : Ин-т экологии Волж. бассейна РАН, 2001. 148 с.

Селезнева К. В., Селезнева А. В., Селезнев В. А. Трансформация термического режима Куйбышевского водохранилища на фоне глобального потепления климата // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2023. № 3. С. 57–67.

Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ Волги (2019–2020 гг.) / Н. М. Минеева, И. В. Семадени, В. В. Соловьева, О. С. Макарова // Биология внутренних вод. 2022. № 4. С. 357. <https://doi.org/10.31857/S0320965222040210>

Сухаревич В. И., Поляк Ю. М. Глобальное распространение цианобактерий: причины и последствия (обзор) // Биология внутренних вод. 2020. № 6. С. 562–572.

Bertani I., Primicerio R., Rossetti G. Extreme climatic event triggers a lake regime shift that propagates across multiple trophic levels // Ecosystems. 2016. Vol. 19, Iss. 1. P. 16. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9914-5>

Cyanobacterial blooms modify food web structure and interactions in western Lake Erie / R. D. Briland, J. P. Stone, M. Manubolu [et al.] // Harmful Algae. 2020. Vol. 92. 101586. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.03.004>

Dziallas C., Grossart H. P. Increasing oxygen and water temperature select for toxic *Microcystis* sp. // PLoS ONE. 2011. Vol. 6, N 9. P. 1.

Lakes as sentinels of climate change / R. Adrian, C. M. O'Reilly, H. Zagareze [et al.] // Limnol., Oceanogr. 2009. Vol. 54, N 6. Pt. 2. P. 2283.

Long-term trends and temporal synchrony in plankton richness, diversity and biomass driven by re-oligotrophication and climate across 17 Danish Lakes / K. Özkan, E. Jeppesen, T. A. Davidson [et al.] // Water. Vol. 8, N 10. 2016. P. 427. <https://doi.org/10.3390/w8100427>

Paerl H. W., Paul V. J. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria // Water Res. 2012. Vol. 46. P. 1349.

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. Vol. 10. P. 167.

Seleznev V. A., Bespalova K. V., Selezneva A. V. Seasonal variability of phosphate content in the Volga water under conditions of anthropogenic eutrophication of reservoirs // Journal of Water

Chemistry and Technology. 2018. Vol. 40, Iss. 5. P. 307–311. <https://doi.org/10.3103/S1063455X18050107>

Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes / S. Kosten, V. Huszar, E. Becares [et al.] // *Glob. Change Biol.* 2012. Vol. 18. P. 118.

References

Mineyeva N.M., Poddubnyy S.A., Stepanova I.E., Tsvetkov A.I. Abioticheskiye faktory i ikh rol v razvitiy fitoplanktona Volgi. Vodokhranilishcha sredney Volgi [Abiotic factors and their role in the development of Volga phytoplankton]. *Biologiya vnutr. vod.* [Biologiya vnutr. vod], 2022, no. 6, pp. 640. <http://doi.org/10.31857/S0320965222060158> (in Russian)

Ashikhmina T.Y.A., Kut'yavina T.I., Domnina Ye.A. Izucheniye protsessov evtrofikatsii prirodnykh i iskusstvenno sozdannykh vodoyomov (literaturnyy obzor) [Study of the processes of eutrophication of natural and artificially created reservoirs (literature review)]. *Teoreticheskiye problemy ekologii* [Theoretical problems of ecology], 2014, no. 3, pp. 6-13. (in Russian)

Datsenko YU.S., Puklakov V.V., Edelshteyn K.K. Analiz vliyaniya abioticheskikh faktorov na razvitiye fitoplanktona v maloprotocnom stratifitsirovannom vodokhranilishche [Analysis of the influence of abiotic factors on the development of phytoplankton in a low-flow stratified reservoir]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, no. 10, pp. 73-85. (in Russian)

Zelenevskaya N.A. Osobennosti razvitiya fitoplanktona Saratovskogo vodokhranilishcha v 2019 godu [Analysis of the influence of abiotic factors on the development of phytoplankton in a low-flow stratified reservoir]. *Tatishchevskiy chteniya: aktualnyye problemy nauki i praktiki* [Tatishchevsky readings: current problems of science and practice]. Proc. 27th Intern. sci. and pract. conf.]. Tolyatti, Volzhskiy Univ. named V.N. Tatishchev, 2020, vol. 2, pp. 230. (in Russian)

Lazareva V.I., Stepanova I.E., Tsvetkov A.I. et al. Kislorodnyy rezhim vodokhranilishch Volgi i Kamy v period potepleniya klimata: posledstviya dlya zooplanktona zoobentosa [Oxygen regime of the Volga and Kama reservoirs during the period of climate warming; consequences for zoobenthos zooplankton]. *Trudy IBVV RAN* [Proceedings of the IBW RAS], 2018, iss. 81(84), pp. 47-84. <https://10.24411/0320-3557-2018-1-0005> (in Russian)

Kopylov, A.I., Maslennikova, T.S., Kosolapov, D.B. Sezonnnyye i mezhdgovyye kolebaniya pervichnoy produktsii fitoplanktona v Rybinskom vodokhranilishche: vliyaniye pogodnykh i klimaticheskikh izmeneniy [Seasonal and interannual fluctuations in the primary production of phytoplankton in the Rybinsk Reservoir: the influence of weather and climate changes]. *Vodnyye resursy* [Water Resources], 2019, vol.46(3), pp. 270-277. <http://www.doi.org/10.31857/S0321-0596463270-277> (in Russian)

Litvinov A.S., Zakonnova A.V. Termicheskiy rezhim Rybinskogo vodokhranilishcha pri globalnom poteplenii [Thermal regime of the Rybinsk reservoir under global warming] *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2012, no. 9, pp. 91-96. (in Russian)

Pautova V.N., Nomokonova V.I., Dinamika soderzhaniya khlorofilla "a" v fitoplanktone Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Dynamics of chlorophyll "a" content in the phytoplankton of the Kuibyshev reservoir]. *Gidrobiologicheskyy zhurnal* [Hydrobiological Journal], 2002, vol. 38, no. 6, pp. 3-9. (in Russian)

Popchenko I.I. *Vidovoy sostav i dinamika fitoplanktona Saratovskogo vodokhranilishcha* [Species composition and dynamics of phytoplankton in the Saratov Reservoir]. Togliatti, Institute of Ecology Volzhskiy basin RAS Publ., 2001, 148 p. (in Russian)

Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Transformatsiya termicheskogo rezhima Kuybyshevskogo vodokhranilishcha na fone globalnogo potepleniya klimata [Transformation of the thermal regime of the Kuibyshev reservoir against the backdrop of global warming]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology], 2023, no. 3, pp. 57-67. (in Russian)

Mineyeva N.M., Semadeni I.V., Solov'yeva V.V., Makarova O.S. Soderzhaniye khlorofilla i sovremennoye troficheskoye sostoyaniye vodokhranilishch Volgi (2019–2020 gg.) [Chlorophyll content and the current trophic state of Volga reservoirs (2019–2020)]. *Biologiya vnutrennih vod* [Biology of inland waters], 2022, no. 4, pp. 357. <https://doi.org/10.31857/S0320965222040210> (in Russian)

Sukharevich V.I., Polyak YU.M. Globalnoye rasprostraneniye tsianobakteriy: prichiny i posledstviya (obzor) [Global distribution of cyanobacteria: causes and consequences (review)]. *Biologiya vnutrennikh vod* [Biology of inland waters], 2020, no. 6, pp. 562-572. (in Russian)

Bertani I., Primicerio R., Rossetti G. Extreme climatic event triggers a lake regime shift that propagates across multiple trophic levels. *Ecosystems*, 2016, vol. 19, iss. 1, pp. 16. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9914-5>

Briland R.D., Stone J.P., Manubolu M. et al. Cyanobacterial blooms modify food web structure and interactions in western Lake Erie. *Harmful Algae*, 2020, vol. 92, 101586. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.03.004>

Dziallas C., Grossart H.-P. Increasing oxygen and water temperature select for toxic *Microcystis* sp. *PLoS ONE*, 2011, vol. 6, no. 9, pp. 1.

Adrian R., O'Reilly C.M., Zagareze H. et al. Lakes as sentinels of climate change. *Limnol., Oceanogr.*, 2009, vol. 54, no. 6, pt. 2, pp. 2283.

Özkan K., Jeppesen E., Davidson T.A. et al. Long-term trends and temporal synchrony in plankton richness, diversity and biomass driven by reoligotrophication and climate across 17 Danish Lakes. *Water*, 2016, vol. 8, no. 10, pp. 427. <https://doi.org/10.3390/w8100427>

Paerl H.W., Paul V.J. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Res.*, 2012, vol. 46, pp. 1349.

Robarts R.D., Waiser M.J., Arts M.T., Evans M.S. Seasonal and diel changes of dissolved oxygen in a hypertrophic prairie lake. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2005, vol. 10, pp. 167.

Seleznev V. A., Bepalova K. V., Selezneva A. V. Seasonal variability of phosphate content in the Volga water under conditions of anthropogenic eutrophication of reservoirs. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2018, vol. 40, iss. 5, pp. 307-311. <https://doi.org/10.3103/S1063455X18050107>.

Kosten S., Huszar V.L.M., Becares E. et al. Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. *Glob. Change Biol.*, 2012, vol. 18, pp. 118.

Сведения об авторах

Селезнева Александра Васильевна
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник лаборатории
мониторинга водных объектов
Институт экологии Волжского бассейна
РАН – филиал Самарского ФИЦ РАН
Россия, 445003, г. Тольятти, ул. Комзина, 10
e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Селезнев Владимир Анатольевич
доктор технических наук, кандидат
географических наук, профессор, главный
научный сотрудник, лаборатория
мониторинга водных объектов
Институт экологии Волжского бассейна
РАН – филиал Самарского ФИЦ РАН
Россия, 445003, г. Тольятти, ул. Комзина, 10
e-mail: seleznev53@mail.ru

Information about the authors

Selezneva Alexandra Vasilievna
Candidate of Sciences (Technics), Associate
Professor, Senior Researcher, Laboratory for
Monitoring of Water Objects
Institute of Ecology of the Volga Basin RAS – a
Branch of the Samara Federal Research Center
RAS
10, Komzin st., Togliatti, 445003,
Russian Federation
e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Seleznev Vladimir Anatolievich
Doctor of Sciences (Technics), Candidate of
Sciences (Geography), Professor, Chief
Researcher, Laboratory for Monitoring Water
Objects
Institute of Ecology of the Volga Basin RAS – a
Branch of the Samara Federal Research Center
RAS
10, Komzin st., Togliatti, 445003,
Russian Federation
e-mail: seleznev53@mail.ru

Коды научной специальности: 1.6.16

Статья поступила в редакцию **13.02.2024**; одобрена после рецензирования **07.03.2024**; принята к публикации **11.03.2024**
The article was submitted **February, 13, 2024**; approved after reviewing **March, 07, 2024**; accepted for publication **March, 11, 2024**