

УДК 574.52

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ НА СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА В ВОДЕ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2025 А.В. Селезнева, В.А. Селезнев

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

Статья поступила в редакцию 14.10.2025

Массовое развитие синезеленых (*Cyanophyta*) водорослей – это характерное явление для большинства поверхностных водных объектов, благодаря которому развивается процесс «цветения» вод, оказывающий негативное влияние на водоснабжение, рыбное хозяйство и рекреацию. В условиях глобального потепления климата усиливается интерес к оценке влияния гидрометеорологических факторов на развитие процесса «цветения» вод. Комплексные наблюдения за температурой воздуха и воды, содержанием хлорофилла «а» и таксономическим составом водорослей проводились на Куйбышевском водохранилище в летний период 2016–2021 гг. Данные о расходах и уровнях воды получены от филиала ПАО «РусГидро» – «Жигулевская ГЭС». Установлено, что основными факторами, влияющими на содержание хлорофилла, являются температура воды и погодные условия. С повышением температуры воды содержание хлорофилла увеличивается, в составе фитопланктона доминирует группа синезеленых (*Cyanophyta*) водорослей. Наиболее благоприятными для развития процесса «цветения» стали теплые 2016 и 2021 годы, а менее благоприятными стали холодные 2017 и 2019 годы, когда доминировали диатомовые (*Bacillariophyta*) и зеленые (*Chlorophyta*) водоросли. Значительная вариабельность концентрации хлорофилла в период «цветения» вод обусловлена сменой погодных условий. При антициклическом типе погоды концентрация хлорофилла резко увеличивалась за счет устойчивой солнечной и безветренной погоды. Наоборот, при циклическом типе погоды концентрация хлорофилла снижалась. При дальнейшем повышении температуры воды Куйбышевского водохранилища воды в условиях глобального потепления климата процесс «цветения» вод будет усиливаться, что может привести к нарушению экологического устойчивости экосистемы водохранилища и создать риски использования водохранилища для комплексного водопользования.

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

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-373-383

EDN: ROMMKK

Работа выполнена в рамках государственного задания, номер 1024032700087-2-1.6.19; 1.6.17

ВВЕДЕНИЕ

Для поверхностных водоемов эвтрофного типа характерным является процесс «цветения» вод [1–9]. На Куйбышевском водохранилище его возбудителями являются синезеленые (*Cyanophyta*) водоросли, которые доминируют в составе летнего фитопланктона [10]. Средняя биомасса водорослей в летний период изменяется в широких пределах от 4–16 мг/дм³, а максимальная – 40–160 мг/дм³. Вода приобретает неприятный запах и специфический цвет, увеличивается содержание взвешенных и растворенных органических веществ, нарушается режим кислорода, возникает угроза токсического загрязнения водных масс. Из-за ухудшения качества вод возникают риски использования водоемов для хозяйствственно-питьевого водоснабжения, рыбного хозяйства и рекреации [11].

В условиях глобального потепления климата [12–15] интерес к исследованию процесса «цветения» вод усиливается [16–18]. Одним из важнейших показателей потепления климата является тренд на повышение температуры приземного слоя атмосферы. По данным Росгидромета за по-

Селезнева Александра Васильевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов. E-mail: alek.selezneva@mail.ru

Селезнев Владимир Анатольевич, главный научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов. E-mail: seleznev53@mail.ru

следние 100 лет общее повышение температуры воздуха для территории России составило 1,0 °C, что на 0,4 °C выше, чем в среднем для Земного шара. Начиная с 70-х годов прошлого века каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего.

Повышение температуры воздуха приводит к изменению термического режима водных объектов [19]. На Верхней Волге на Рыбинском водохранилище проведены исследования изменений температуры поверхностного слоя воды, обусловленные потеплением климата. За период 1976–2008 гг. установлена тенденция повышения средней температуры поверхностного слоя воды во все месяцы при максимальной скорости повышения в июле – 0,89 °C/10 лет [20]. На Средней Волге на Куйбышевском водохранилище в современный период (2001–2023 гг.) температура воды в без ледоставный период (апрель–ноябрь) увеличилась на 1,5 °C по сравнению с историческим периодом (1958–1980 гг.). Продолжительность периода между весенними и осенними переходами температуры воды через контрольные значения увеличилась: на 14 дней – для 0,2 °C; на 15 дней – для 4 °C; на 8 дней – для 10 °C [21].

Есть основания предполагать, что климатическая трансформация термического режима водоемов обуславливает активизацию процесса «цветения» вод [22, 23]. Однако, единого мнения по данному вопросу нет. Часть исследователей убеждена, что повышение температуры воды приводит к увеличению продуктивности фитопланктона, а другие – наоборот считают, что фактор температуры в летний период не влияет на развитие фитопланктона [24–32]. Следовательно, закономерности развития летнего фитопланктона недостаточно изучены, несмотря на то, что основные факторы развития фитопланктона известны. Трудность состоит в том, что эти факторы действуют одновременно, хотя и с разной интенсивностью. Не имея надежных количественных оценок влияния отдельных факторов, невозможно получить результат их сложной комбинации и прогнозировать процесс «цветения» вод.

Основная цель исследований – дать количественную оценку влияния абиотических факторов на биомассу водорослей в летний период на Куйбышевском водохранилище. Полученные результаты будут способствовать совершенствованию прогнозов «цветения» вод при различных сценариях климатических изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения закономерностей процесса «цветения» вод целесообразно использовать такой показатель, как содержание хлорофилла «а» (Хл) в водорослях, так как существует закономерная связь между его количеством и биомассой водорослей. Для эвтрофного водоема биомасса водорослей изменяется в широких пределах от 4 до 16 мг/дм³, при этом средняя концентрация Хл составляет 12–48 мкг/дм³, а максимальная – 25–75 мкг/дм³.

В качестве района исследований выбран Приплотинный плес Куйбышевского водохранилища, где процесс «цветения» вод наблюдается практически ежегодно, но с различной интенсивностью, которая зависит от большого количества абиотических факторов. Для изучения влияния главных факторов на развитие процесса «цветения» вод использованы материалы комплексных наблюдений в летний период (июнь–август) 2016–2021 гг.

Наблюдения на акватории водохранилища проводились в районе с. Ягодное на расстоянии 100 м от левого берега. Измерение температуры воды и отбор проб воды осуществлялись в поверхностном горизонте (0,5 м). Температура воды измерялась ежедневно в 8 и 20 часов (местное время) родниковым термометром в оправе Шпинделера. Цена деления термометра 0,2 °C, следовательно, отсчет с термометра снимался с точностью до 0,1 °C. Ежедневные данные о приземной температуре воздуха получены с метеорологической станции Тольятти, расположенной в непосредственной близости от района исследований. Дополнительно на акватории водохранилища осуществлялся визуальный контроль погодных условий: облачность, осадки, ветер и волнение. Данные об уровнях и расходах воды водохранилища получены от филиала ПАО «РусГидро» – «Жигулевская ГЭС».

Гидрохимические и гидробиологические пробы воды на акватории водохранилища отбирались одновременно, но с разной дискретностью. Воду для определения хлорофилл «а» (Хл) и биогенных веществ (нитратов и фосфатов) отбирали 1 раз в 10 дней. Содержание Хл определялось методом спектрофотометрии в соответствии с ГОСТ 17.1.04.02-90, а определение нитратов и фосфатов осуществлялось в соответствии с действующими методиками Росгидромета. По динамике концентрации Хл возможно выделение периодов «цветения» фитопланктона [33]. Полученные значения Хл указывают на количество биомассы фитопланктона и его численность. Содержание Хл считается универсальной эколого-физиологической характеристикой развития и фотосинтетической активности водорослей, позволяющей выражать биомассу в единицах этого важнейшего компонента растительной клетки. Неоспоримое преимущество хлорофильного метода заключается в его экс-

пресности и более высокой, по сравнению с микроскопическим учетом водорослей, воспроизведимостью результатов [34].

Пробы для определения таксономического состава водорослей были собраны одновременно с пробами воды для определения Хл. Состав основных групп водорослей определялся на разных этапах развития процесса «цветения» вод. Определялись доминантные таксономические группы водорослей.

Отдельно для каждого года по ежедневным данным по температуре воды была выделена периоды температурного оптимума (ТО), благоприятные для массового развития синезеленых водорослей. В качестве критерия выделения периодов ТО выбрано значение температуры воды, равное 22 °C, при которой обычно начинается процесс «цветения» вод на Куйбышевском водохранилище. Период оптимума включает следующие температурные градации: слабая ($23^{\circ}\text{C} > t > 22^{\circ}\text{C}$), умеренная ($24^{\circ}\text{C} > t \geq 23^{\circ}\text{C}$), сильная ($25^{\circ}\text{C} > t \geq 24^{\circ}\text{C}$), очень сильная ($26^{\circ}\text{C} > t \geq 25^{\circ}\text{C}$) и экстремальная ($t > 26^{\circ}\text{C}$), которые характеризуют степень благоприятных условий для развития процесса «цветения» вод.

Для обработки данных наблюдений и информационных материалов использованы корреляционный и регрессионный методы анализа, определялись: индекс корреляции (R), коэффициент детерминации (R^2), линейные тренды и критерий Фишера для оценки достоверности полученных результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки влияния абиотических факторов на процесс «цветения» вод в летний период 2016–2021 гг. анализировались данные о температуре воздуха и воды, расходах и уровнях воды, содержании основных биогенных веществ (нитратов, фосфатов), концентрации хлорофилла и таксономическом составе водорослей. Сравнительный анализ показал, что условия для развития процесса «цветения» вод существенно отличались для каждого конкретного года, что сказалось на интенсивности и продолжительности процесса «цветения» вод.

Расход и уровень воды. Среди шести лет наблюдений самым многоводным было лето 2017 г., когда средний расход воды составил 12021 м³/с, что значительно превышает многолетнюю норму. Самым маловодным было лето 2021 г., когда средний расход воды составил 5681 м³/с. В сезонном аспекте необычно многоводным был июль 2017 г., когда расход воды составил 14144 м³/с, а наименьший расход воды наблюдался в августе 2018 г. и составил 4981 м³/с (табл. 1).

Таблица 1. Изменения абиотических факторов в летний период 2016–2021 гг.

Год	июнь	июль	август	среднее	июнь	июль	август	среднее
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	13779	14144	8140	12021	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	13245	6011	5788	8348	53,12	52,80	52,63	52,85
2021	6441	5262	5339	5681	52,92	52,62	51,86	52,47
Нитраты (N), мгN/дм ³					Фосфаты (P), 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
Температура воздуха (T), °C					Температура воды (t), °C			
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

Наибольший уровень воды составил 53,06 м и наблюдался летом 2017 г., а наименьший – 52,47 м и наблюдался летом 2021 г. В сезонном аспекте самый низкий средний месячный уровень воды составил 51,86 м и наблюдался в августе 2021 г., а наибольший – в июле 2017 г. и составил 53,20 м (табл. 1).

Биогенные вещества. Средняя месячная концентрация нитратов (N) в летний период 2016–2021 гг. изменялся в диапазоне 0,14–0,54 мгN/дм³. Наибольшая средняя концентрация нитратов наблюдалась летом 2018 г. и составила 0,34 мгN/дм³, а наименьшая – летом 2020 г. и составила 0,23 мгN/дм³. Средняя месячная концентрация фосфатов (P) изменялась в диапазоне 0,021–0,059 мгP/дм³. Наибольшая средняя концентрация фосфатов наблюдалась летом 2019 г. и составила 0,045 мгP/дм³, а наименьшая – летом 2020 г. и составила 0,031 мгP/дм³(табл. 1).

Температура воздуха и воды. Самым теплым оказался 2021 г. со средней летней температурой воздуха 23,8 °С, а самым холодным – 2017 г. с температурой воздуха – 21,1 °С. В сезонном аспекте самым теплым стал июль 2020 г., когда среднемесячная температура воздуха составила 25,3 °С. Для августа месяца самым теплым оказался 2016 г., когда средняя месячная температура воздуха составила 24,1 °С.

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

Хлорофилл а. Самые большие средние летние концентрации Хл наблюдались в 2021 и 2016 годах и составили 7,4 и 6,3 мкг/дм³, соответственно. Самые маленькие концентрации Хл наблюдались в 2017 и 2019 годах и составили 0,7 и 1,8 мкг/дм³. В сезонном аспекте наибольшие средние месячные концентрации Хл наблюдались в июле 2021 и 2016 годов и составили 12,6 и 10,9 мкг/дм³, соответственно. Максимальные суточные концентрации Хл наблюдались также в июле 2016 и 2021 годов и составили 22,6 и 21,9 мкг/дм³, соответственно (табл. 2). Наибольшая вариабельность содержания Хл наблюдалась в летний период 2016 и 2021 годов.

Таксономический состав водорослей. Летом 2016, 2018, 2020 и 2021 годов при температуре воды более 22 °С в составе водорослей доминировали синезеленые (*Cyanophyta*) водоросли, благодаря которым развивался процесс «цветения» вод различной интенсивности и продолжительности. Летом 2017 и 2019 годов температура воды в основном не превышала 22 °С, в составе водорослей доминировали диатомовые (*Bacillariophyta*) и зеленые (*Chlorophyta*) водоросли. Полученные результаты согласуются с ранее установленным фактом, что на Куйбышевском водохранилище в июне происходит смена в составе водорослей. В июне доминируют диатомовые, а июле и августе – синезеленые водоросли [10, 33].

Таблица 2. Средние и максимальные концентрации хлорофилла а в летний период 2016–2021 гг., мкг/дм³

од	Июнь		Июль		Август		Лето	
	средние	max	средние	max	средние	max	средние	max
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

Для оценки связи между среднемесячными концентрациями Хл и значениями абиотических факторов рассчитывались индексы корреляции (R). Результаты расчета показали, что степень тесноты линейной связи между летними значениями Хл и Т, Хл и t характеризуется как сильная, когда R составляет 0,74 и 0,71, соответственно. Между содержанием Хл и другими абиотическими факторами (N, Q, P) степень тесноты связи характеризуется как слабая с индексом корреляции в диапазоне 0,2–0,5. Вероятнее всего, при существующей высокой биогенной нагрузке и наличии пойменных и русловых участков, основными факторами развития процесса «цветения» вод являются гидрометеорологические условия.

Существует большое количество исследований, направленных на оценку влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона. Не вызывает сомнений, что наряду с термическим режимом, такие факторы как динамика водных масс (расход и уровень воды) и содержание биогенных веществ (нитраты и фосфаты) оказывают влияние на развитие фитопланктона. Однако, лимитиру-

ющим фактором развития синезеленых водорослей летом 2017 г. стала низкая температура воды, которая в среднем за летний период составила 19,2 °С. Летом 2017 г. процесс «цветения» не наблюдался, что подтверждается низким содержанием хлорофилла.

Полученная для июля и августа зависимость между Хл и t в виде уравнения регрессии ($Xl = 2,36t - 47,09$) показывает, что с ростом температуры воды содержание Хл увеличивается. Индекс корреляции составляет 0,71, а коэффициент детерминации (R^2) – 0,71 (рис. 1).

Для самого теплого месяца июля индекс корреляции (R) увеличился и составил 0,92, коэффициент детерминации (R^2) также увеличился и составил 0,84, что позволяет по заданным значениям t рассчитывать значения Хл. Между июльской температурой воздуха (T) и воды (t) существует сильная положительная связь с коэффициентом корреляции 0,86. Полученное регрессионное уравнение ($t = 1,17T - 5,35$) позволяет по заданным значениям T рассчитывать значения t , так как коэффициент детерминации (R^2) составляет 0,73. Достоверность обеих регрессионных уравнений установлена с использованием критерия Фишера, и оба уравнения могут быть использованы для прогноза концентрации Хл по температуре воздуха.

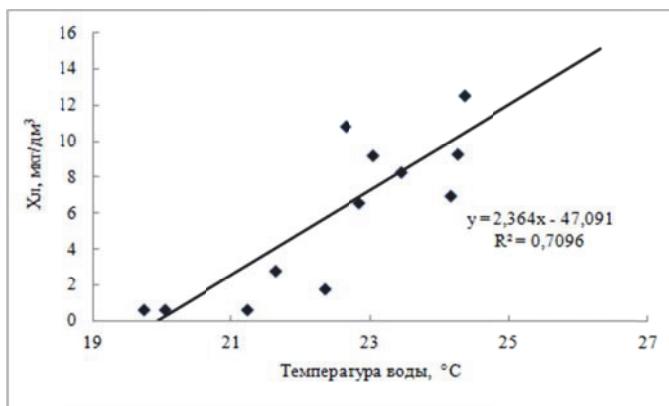


Рис. 1. Зависимость содержания хлорофилла «а» от температуры воды

Концентрация Хл зависит от температуры воды, а температура воды от температуры воздуха. С ростом температуры концентрация Хл увеличивается. Согласно регрессионного уравнения средняя июльская концентрация Хл составляла 0,4 мкг/дм³ при температуре воды 20,0 °С, при температуре воды 22,0 °С – 6,1 мкг/дм³, при температуре воды 24,0 °С – 11,8 мкг/дм³ (рис. 1). Используя связь между T , t и Хл можно рассчитать июльскую концентрацию Хл при различных температурах воздуха. Например, при температуре воздуха в 26,0 °С, температура воды составит 25,0 °С, а концентрация хлорофилла достигнет 14,6 мкг/дм³.

Среди шести лет наиболее благоприятным для развития процесса «цветения» вод стал 2021 г. Средняя летняя температура воздуха составила 23,8 °С. Лето наступило рано, уже в июне средняя месячная температура воздуха составила 22,8 °С. В июле температура достигла наибольших значений и составила 24,6 °С, а в августе немного понизилась и составила 23,9 °С (табл. 1). Диапазон колебаний температур составил в июне 15,0–31,0 °С, в июле – 18,0–31,0 °С, в августе – 16,0–32,0 °С.

Для динамики температуры воздуха характерна периодичность повышения и понижения температуры воздуха, что обусловлено сменой типа погоды. Во время действия антициклона наблюдалась ясная и безветренная погода, что способствовало формированию экстремально высоких температур воздуха. Летом 2021 г. отмечено несколько экстремально высоких температур воздуха: 31,0 °С (29 июня); 31,0 °С (10 июля); 32,0 °С (21 августа).

Средняя летняя температура воды в 2021 г. составила 23,1 °С. Уже в июне средняя месячная температура воды составляла 20,7 °С, а в июле и августе достигла 24,3 °С и 24,1 °С, соответственно. В летний период были выделены 2 периода температурного оптимума (ТО) для синезеленых водорослей. Продолжительность первого периода составила 17 дней, и наблюдался он с 21 июня по 8 июля. Второй период ТО продолжалась 55 дней с 9 июля по 1 сентября. Общее число благоприятных дней для процесса «цветения» вод составляло 72. Условия для формирования слабой степени развития водорослей (23 °С > t ≥ 22 °С) наблюдались 10 дней, умеренной (24 °С > t ≥ 23 °С) – 15 дней, сильной (25 °С > t ≥ 24 °С) – 23 дня, очень сильной (26 °С > t ≥ 25 °С) – 24 дня и экстремально высокой (t ≥ 26 °С) – 7 дней.

В летний период 2021 г. среднее содержание Хл составило 7,4 мкг/дм³. В июне среднее содержание Хл составило 3,7 мкг/дм³, в июле – 12,6 мкг/дм³ и в августе – 5,4 мкг/дм³. Процесс цветения начался в конце июня, когда концентрация Хл стала резко увеличиваться (рис. 2). Наибольшее содержание Хл наблюдалось 15 июля в период действия антициклического типа погоды и состави-

ло 22,6 мкг/дм³ при температуре воды 24,6 °С и воздуха 30,1 °С. После 24 августа температура воздуха стала резко снижаться, и 30 августа составила 15,2 °С. Температура воды вплоть до 1 сентября оставалась больше 22,0 °С. Поэтому содержание Хл весь август сохранялось в пределах 3,1–9,4 мкг/дм³. Значительная вариабельность содержания Хл наблюдалась в июле. При установлении ясной и безветренной погоды содержание Хл резко возрастало, а при облачной и ветреной погоде резко снижалось. Антициклический тип погоды создавал благоприятные условия для массового развития синезеленых водорослей.

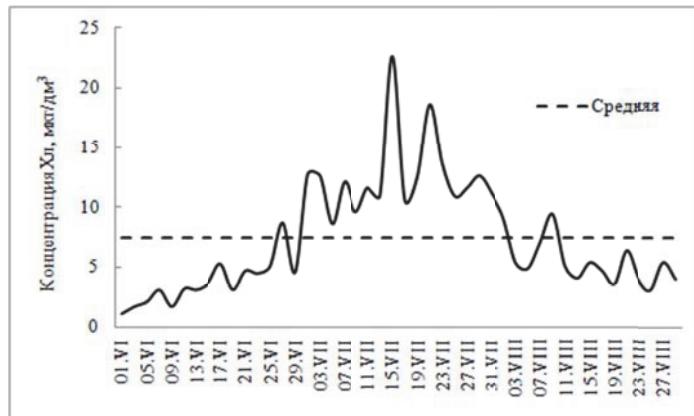


Рис. 2. Изменения концентрации хлорофилла «а» в 2021 г.

В летний период таксономический состав водорослей менялся. При слабом развитии процесса «цветения» вод в составе водорослей доминировали диатомовые (*Bacillariophyta*) и Зеленые (*Chlorophyta*) водоросли, а с 11 июля уже доминировали синезеленые (*Cyanophyta*), которые вызывали «цветение» вод. С 7 августа вновь стали доминировать диатомовые (*Bacillariophyta*) и зеленые (*Chlorophyta*) водоросли.

Вторым благоприятным для процесса «цветения» вод стал теплый 2016 г. Средняя летняя температура воздуха составила 22,7 °С. Среднемесячная температура воздуха составила в июне 20,3 °С, в июле увеличилась до 23,6 °С, а в августе ещё увеличилась и составила 24,1 °С (табл. 1). Для динамики температуры воздуха характерна периодичность повышения и понижения температуры воздуха. Диапазон колебаний температур в июне составляет 13,4–26,0 °С, в июле – 17,0–28,7 °С, в августе – 12,0–30,0 °С. Наибольшее повышение температуры наблюдалось с 13 по 15 августа с максимальной суточной температурой воздуха в 30,1 °С. Летом 2016 г. отмечено несколько экстремальных температур воздуха: 31,0 °С (29 июня); 31,0 °С (10 июля); 32,0 °С (21 августа).

Средняя за лето температура воды в 2016 г. составила 22,1 °С. Средняя месячная температура воды в июне составляла 19,5 °С, в июле повысилась до 22,6 °С, в августе достигла 24,1 °С (табл. 1). За лето выделены два периода ТО, когда суточная температура воды составляла ≥ 22 °С [18]. Первый период ТО продолжался 8 дней с 21 по 28 июня, а второй – 58 дней с 5 июля по 1 сентября. Общее число благоприятных дней за лето составило 66. Из них 22 дня попали в температурный диапазон 23 °С $> t \geq 22$ °С, 20 дней – в диапазон 24 °С $> t \geq 23$ °С, 23 дня – в диапазон 25 °С $> t \geq 24$ °С и 1 день – в диапазон 26 °С $> t \geq 25$ °С.

В теплом 2016 г. среднее содержание Хл за лето составило 6,3 мкг/дм³. В июне содержание Хл составило 3,1 мкг/дм³, а в составе водорослей в основном доминировали диатомовые и зеленые. Начиная с 29 июня, содержание Хл резко увеличилось (рис. 3) и его среднее содержание в июле составило 10,9 мкг/дм³. При этом в поверхностном слое доминировали синезеленые водоросли. В августе, несмотря на благоприятные температурные условия, содержание Хл составило всего 4,6 мкг/дм³. В июле содержание Хл характеризовалось значительной вариабельностью и резко изменялось в диапазоне 5,1–21,9 мкг/дм³, что обусловлено изменчивостью погодных условий. Наибольшее содержание Хл наблюдалось 17 июля при температуре воды в 29,1 °С.

В холодном 2017 г. средняя летняя температура воздуха составила 21,1 °С. В июне средняя температура воздуха составила 18,5 °С, в июле увеличилась до 22,2 °С, а в августе ещё увеличилась и составила 22,6 °С (табл. 1). В июле и августе наблюдалось несколько циклов резкого повышения температуры воздуха. Самый значительный цикл наблюдался с 28 июля по 03 августа с максимальной суточной температурой воздуха в 29,2 °С.

Средняя летняя температура воды составила 19,2 °С. В июне она составила 15,2 °С, июле – 20,0 °С, августе – 22,3 °С. Устойчивый переход температуры воды через 22 °С произошел поздно 29 июля. В летний период были выделены 2 периода ТО. Продолжительность первого периода ТО составила 17 дней с 29 июля по 14 августа, в второго – 9 дней с 20 по 28 августа. Общее количество дней с $t \geq$

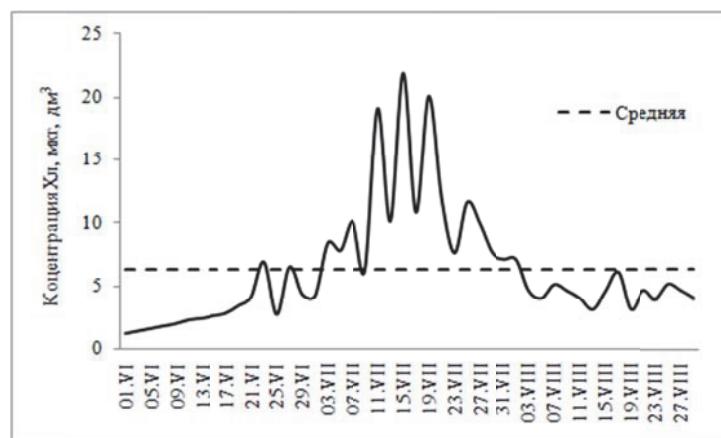


Рис. 3. Изменения концентрации хлорофилла «а» в 2016 г.

22 °С составило 26. Из них 21 день попали в температурный диапазон 23 °С > t ≥ 22 °С и 5 дней – в диапазон 24 °С > t ≥ 23 °С.

В летний период холодного 2017 г. из-за низких температур воды всё лето содержание Хл было крайне низким и составило в среднем 0,6 мкг/дм³. В июне содержание Хл составило 0,4 мкг/дм³, июле – 0,7 мкг/дм³ и августе – 0,8 мкг/дм³. Устойчивый переход температуры воды через 22 °С состоялся только в конце июля. Поэтому даже максимальные значения Хл оставались крайне низкими 0,4–1,9 мкг/дм³. В составе водорослей в июне-августе доминировали диатомовые (Bacillariophyta) и зеленые (Chlorophyta), поэтому процесс «цветения» вод в 2017 г. не наблюдался. Лимитирующим фактором развития синезеленых водорослей стала низкая температура воды, которая в

В холодном 2019 г. процесс «цветения» вод также не наблюдался. Средняя температура воздуха составила 21,3 °С. В июне средняя температура воздуха была высокая и составила 22,4 °С, в июле увеличилась до 23,1 °С, а в августе резко снизилась и составила 18,3 °С (табл. 1). За летний период средняя температура воды составила 20,5 °С. В июне она составила 20,3 °С, июле – 21,6 °С, августе – 19,7 °С. (табл. 1). Летом выделены две зоны ТО, для которых температура воды ≥ 22 °С. Первая зона продолжалась 5 дней с 23 по 27 июня, а вторая – 6 дней с 21 по 26 июля. Общее количество дней с t ≥ 22 °С составило 11. Из них 10 дней попали в температурный диапазон 23 °С > t ≥ 22 °С и 1 день – в диапазон 25 °С > t ≥ 24 °С.

Среднее содержание Хл в летний период 2019 года составило 1,8 мкг/дм³. Среднее содержание Хл в июне составило 1,9 мкг/дм³, в июле – 2,9 мкг/дм³ и в августе – 0,4 мкг/дм³. Наибольшее содержание Хл наблюдалось 21 июля и составило 4,6 мкг/дм³ при температуре воды 22,6 °С и воздуха 29,2 °С, ясной и штилевой погоде. В августе температура воздуха резко уменьшилась до 14,6 °С, температура воды уменьшилась до 19,2 °С, что обусловило снижение содержания Хл до 1,2 мкг/дм³.

Регулярные наблюдения на Куйбышевском водохранилище в летний период 2016-2021 гг. за абиотическими факторами и хлорофиллом позволяют оценить значительное влияние температурных и погодных условий на динамику хлорофилла и развитие синезеленых (Cyanophyta) водорослей. С ростом температуры воды содержание хлорофилла увеличивалось, после достижения температуры воды более 22 °С, когда в фитопланктона доминируют синезеленые (Cyanophyta) водоросли.

Обращает на себя внимание значительная изменчивость концентрации Хл, которую нельзя объяснить только зависимостью от температуры воздуха и воды. Помимо термического режима, после достижения температуры воды более 22 °С, появляется дополнительный фактор, который оказывает существенное влияние на содержание Хл. Этим фактором является ясная и штилевая погода, которая устанавливается во время антициклической деятельности и при которой концентрация Хл резко увеличивается, так как создаются крайне благоприятные условия для развития синезеленых (Cyanophyta) водорослей. Поэтому в июле 2021 и 2016 гг. вариабельность содержания Хл весьма существенна.

Значимость полученных результатов в условиях глобального потепления климата возрастает, так как установлено, что содержание Хл и массовое развитие синезеленых водорослей зависят от термического режима и погодных условий. Одним из важнейших показателей глобального потепления климата является региональный тренд на повышение температура воздуха на Средней и Нижней Волге. Начиная с 70-х годов прошлого века каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего. В последние годы (2016-2021 гг.) повышение температуры воздуха происходит наиболее интенсивно, особенно в июле в период массового развития синезеленых водорослей. Повышение температуры воздуха обуславливает климатическую трансформацию термического режима

Куйбышевского водохранилища, наметилась устойчивая тенденция повышения температуры воды и увеличение продолжительности теплого периода [21]. Изменение термического режима водохранилищ Волги подтверждается и другими исследователями [11].

Анализ данных многолетних наблюдений за температурой воздуха (метеостанция Тольятти) позволил установить, что за период с 1957 по 2023 годы наметилась устойчивая тенденция повышения приземной температуры воздуха. Средняя за период без ледового покрова (май–ноябрь) температуры воздуха повысилась на 2,5 °C с 11,8 °C до 14,3 °C в соответствии с линейным трендом (рис. 4). Средняя скорость повышения температуры воздуха составил 0,37 °C/10 лет.

Под воздействием роста региональной температуры воздуха повысилась средняя (май–ноябрь) температура воды в Куйбышевском водохранилище на 2,5 °C с 13,3 °C до 15,8 °C в соответствии с линейным трендом (рис. 4). Средняя скорость повышения температуры воды совпадает с трендом температуры воздуха и составила 0,37 °C/10 лет.

При оценке статистической значимости трендов по критерию Фишера были определены коэффициенты детерминации (R^2), которые показывают вклад линейного тренда в общую изменчивость температуры воздуха ($R^2 = 0,35$) и воды ($R^2 = 0,50$). Сравнивая фактическое и табличное значение критерия Фишера, сделан вывод о статистической значимости (достоверности) определенных трендов.

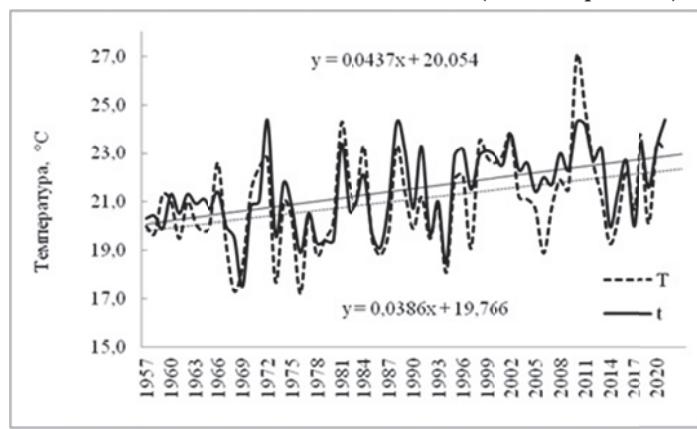


Рис. 4. Изменение июльской температуры воды (t) и воздуха (T) на фоне линейных трендов в 1957–2023 гг.

Наблюдаемое повышение температуры воды – это важнейший фактор, способствующий распространению и доминированию синезеленых (*Cyanophyta*) водорослей в водохранилище. Для повышения достоверности, разрабатываемых прогнозов процесса «цветения» вод, необходима организация детальных комплексных наблюдений, включающих широкий спектр абиотических и биотических показателей, при различных синоптических условиях.

ВЫВОДЫ

Анализ комплексных наблюдений за основными абиотическими факторами, а также за содержанием хлорофилла и таксономическим составом водорослей на Куйбышевском водохранилище в летний период 2016–2021 гг. показал, что температура воды и погодные условия являются ведущими факторами формирования и динамики процесса «цветения» вод. Наиболее благоприятными для развития процесса «цветения» вод стали теплые 2016 и 2021 годы, когда среднее содержание хлорофилла за лето составило 6,2 и 7,2 мкг/дм³, соответственно. В этот период на водохранилище доминировали синезеленые (*Cyanophyta*) водоросли. Не благоприятными для развития процесса «цветения» вод стали холодные 2017 и 2019 годы, когда среднее содержание хлорофилла за лето составило 0,6 и 1,4 мкг/дм³, соответственно. Процесс «цветения» вод не развивался из-за низких температур воды.

Значительная вариабельность процесса «цветения» вод обусловлена сменой погодных условий. Во время действия антициклона и установления солнечной и безветренной погоды содержание хлорофилла резко увеличивалось, а при прохождении циклона с пасмурной и ветреной погодой содержание хлорофилла резко уменьшалось. При солнечной и штилевой погоде максимальное содержание Хл в июле 2021 г. составило 21,9 мкг/дм³, а в июле 2016 г. – 22,6 мкг/дм³.

Установленное влияние температуры воды и погодных условий на содержание хлорофилла позволяет предположить, что при дальнейшем росте температуры воздуха и воды из-за глобального потепления климата содержание хлорофилла будет увеличиваться, возрастет интенсивность и продолжительность процесса «цветения» вод, что негативно отразится на экологическом со-

стоянии и качестве вод Куйбышевского водохранилища. В последующие 50 лет температура воды повыситься еще на 1,8 °С. Среднее содержание хлорофилла в июле может составить 8,5 мкг/дм³, а максимальное – 28,5 мкг/дм³, что может нарушить экологическую устойчивость экосистемы водохранилища и создать риски его использования для питьевого водоснабжения, ведения рыбного хозяйства и рекреации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусева, К.А. «Цветение» воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним / К.А. Гусева // Тр. Всесоюз. гидробиол. общества. – 1952. – Т. 4. – С. 3–92.
2. Сиренко, Л.А. Физиологические основы массового размножения сине-зеленых водорослей в водохранилищах / Л.А. Сиренко. – К.: Наук. Думка. – 1972. – 62 с.
3. Сиренко, Л. А. «Цветение» воды и эвтрофирование / Л.А. Сиренко, М. Я. Гавриленко. – К.: Наук. Думка. – 1978. – 230 с.
4. Румянцев, В.А. Цианобактериальное «цветение» воды – источник проблем природопользования и стимул инноваций в России / Румянцев В.А., Л.Н. Крюков, Ш.Р. Поздняков и др. // Общество. Среда. Развитие. – 2011. – № 2. – С. 222.
5. Ашихмина, Т.Я. Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоёмов (литературный обзор) / Т.Я. Ашихмина, Т.И. Кутянина, Е.А. Домнина // Теоретические проблемы экологии. – 2014. – № 3. – С. 6–13.
6. Сухаревич, В. И. Глобальное распространение цианобактерий: причины и последствия (обзор) / В. И. Сухаревич, Ю.М. Поляк // Биология внутренних вод. – 2020. – № 6. – С. 562–572.
7. 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. V. 92. 101586. DOI:810.1016/j.hal.2019.03.004.
8. Даценко, Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты. – 2007. – М.: ГЕОС. – 252 с.
9. Уманская, М.В. Цианобактериальные цветения воды в пресноводных континентальных водоемах: обзор / М.В. Уманская, М.Ю. Горбунов, Н.Г. Тарасова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25. – № 5. – С. 182–194.
10. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник) / отв. ред. Г. С. Розенберг, Л. А. Выхристюк. Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН. – 2008. – 123 с.
11. Беспалова, К.В. Повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища и риски водопользования / К.В. Беспалова, А.В. Селезнева, В.А. Селезнев // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2023. – № 3. – С. 49–62.
12. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Наукоемкие технологии. – 2022. – 124 с.
13. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования / под ред. академика РАН И.И. Мохова, члена-корреспондента РАН А.А. Макоско, к.ф.-м.н. А.В. Чернокульского. – М.: РАН. – 2024. – 360 с.
14. Переведенцев, Ю.П. Климатические изменения на территории Приволжского федерального округа в XX–XXI веках и их последствия для агросфера / Ю.П. Переведенцев, К.М. Шанталинский, Мирсаева, А.А. Николаев, Ю.П. Переведенцев, К.М. Шанталинский, Н.А. Мирсаева, А.А. Николаев, Т.Р. Аухадеев, В.В. Гурьянов, Б.Г. Шерстюков // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 9. – С. 86–99.
15. Переведенцев, Ю. П. Изменения климата на территории Республики Татарстан / Ю.П. Переведенцев, К.М. Шанталинский, Н.А. Мирсаева и др. // Географический вестник. – 2024. – № 1(68). – С. 103–112. DOI:10.17072/2079-7877-2024-1-103-112.
16. Yan X., Xu X., Wang M., Wang G., Wu S., Li Z., Sun H., Shi A., Yang Y. Climate warming and cyanobacteria blooms: Looks at their relationships from a new perspective. Water Research. – 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2017.09.008.
17. Bertani I., Primicerio R., Rossetti G. Extreme climatic event triggers a lake regime shift that propagates across multiple trophic levels. Ecosystems. – V. 19. – 2016. – P. 16–31. DOI:10.1007/s10021-015-9914-5.
18. 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.
19. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государствах в конце XX столетия / отв. ред. Н. И. Короневич, И. С. Зайцева. – М.: Наука. – 2003. – 367 с.
20. Литвинов, А.С. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении / А.С. Литвинов, А.В. Законнова // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 9. – С. 91–96.
21. Селезнева, К.В. Трансформация термического режима Куйбышевского водохранилища на фоне глобального потепления климата / К.В. Селезнева, А.В. Селезнева, В.А. Селезнев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2023. – № 3. – С. 57–67.
22. Selezneva K. V., Selezneva A. V., and Seleznev V. A. The impact of thermal regime on chlorophyll content in the southern part of the Kuibyshev reservoir // BIO Web of Conferences. – 2025. – Т. 160. – Р. 02036.
23. Kosten S., Huszar V., Becares E. et al. Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. Glob. Change Biol. – 2012. – V. 18. – P. 118.
24. Canale R.P., Vogel A.H. Effect of temperature on phytoplankton growth. Journal of the Environmental Engineering Division of the American Society of Civil Engineers. – 1974. – P. 229–241.
25. Paerl H.W., Paul V.J. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria. Water Res. – 2012. – V. 46. – P. 1349.

26. 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.
27. Минеева, Н.М. Содержание хлорофилла а в единице биомассы фитопланктона (обзор) / Н.М. Минеева, Л.А. Щур // Альгология. – 2012. – Т. 22. – № 4. – С. 423–437.
28. Даценко, Ю.С. Анализ влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона в малопроточном стратифицированном водохранилище / Ю.С. Даценко, В.В. Пуклаков, К.К. Эдельштейн // Труды Карельского научного центра РАН. – 2017. – № 10. – С. 73–85.
29. Минеева, Н.М. 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. 640–651. DOI:10.31857/S0320965222060158.
30. Литвинов, А.С. Характеристика гидрологических условий и распределение фитопланктона в водохранилищах Волжского каскада / А.С. Литвинов, Н.М. Минеева // Водные ресурсы. – 1997. – Т. 24. – № 4. – С. 486–490.
31. Litchman E., Thomas M. K. Effects of temperature and nitrogen availability on the growth of invasive and native cyanobacteria. Hydrobiologia. – 2015. DOI:10.1007/s10750-015-2390-2.
32. Özkan K., Jeppesen E., Davidson T.A. et al. Long-term trends and temporal synchrony in plankton richness, diversity and biomass driven by re-oligotrophication and climate across 17 Danish Lakes. Water. – V. 8. – № 10. – 2016. – P. 427. DOI:10.3390/w8100427
33. Паутова, В.Н. Динамика содержания хлорофилла «а» в фитопланктоне Куйбышевского водохранилища / В.Н. Паутова, В.И. Номоконова // Гидробиологический журнал. – 2002. – Т. 38. – № 6. – С. 3–9.
34. Минеева, Н.М. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ Волги (2019–2020 гг.) / Н.М. Минеева, И.В. Семадени, В.В. Соловьева, О.С. Макарова // Биология внутр. вод. – 2022. – № 4. – С. 367–371. DOI: 10.31857/S0320965222040210

INFLUENCE OF WATER TEMPERATURE ON THE CONTENT OF CHLOROPHYLL IN THE WATER OF THE KUIBYSHEV RESERVOIR

© 2025 A.V. Selezneva V.A. Seleznev

Samara Federal Research Center RAS,
Institute of Ecology of the Volga Basin RAS, Togliatti, Russia

The widespread development of blue-green algae (*Cyanophyta*) is a characteristic phenomenon in most surface water bodies, leading to algal blooms that negatively impact water supplies, fisheries, and recreation. In the context of global warming, there is growing interest in assessing the influence of hydrometeorological factors on the development of algal blooms. Comprehensive observations of air and water temperature, chlorophyll a content, and algal taxonomic composition were conducted at the Kuibyshev Reservoir during the summer period of 2016–2021. Data on water flow and levels were obtained from the Zhigulevskaya HPP branch of PJSC RusHydro. It was established that the main factors influencing chlorophyll content are water temperature and weather conditions. As water temperature increases, chlorophyll content increases, and blue-green algae (*Cyanophyta*) predominate among the phytoplankton. The warm years of 2016 and 2021 were the most favorable for the development of the algae bloom, while the cold years of 2017 and 2019, when diatoms (*Bacillariophyta*) and green algae (*Chlorophyta*) dominated, were less favorable. Significant variability in chlorophyll concentrations during the algae bloom period is due to changing weather conditions. During anticyclone weather, chlorophyll concentrations increased sharply due to persistent sunny and windless weather. Conversely, during cyclonic weather, chlorophyll concentrations decreased. With further increases in water temperature in the Kuibyshev reservoir under conditions of global warming, the algae bloom process will intensify, potentially disrupting the ecological stability of the reservoir ecosystem and creating risks to its use for integrated water management.

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

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-373-383

EDN: ROMMKK

REFERENCES

1. Guseva, K.A. "Tsveteniye" vody, yego prichiny, prognoz i mery bor'by s nim / K.A. Guseva // Tr. Vsesoyuz. gidrobiol. obshchestva. – 1952. – Т. 4. – С. 3–92.
2. Sirenko, J.I.A. Fiziologicheskiye osnovy massovogo razmnozheniya sine-zelenykh vodorosley v vodokhranilishchakh / J.I.A. Sirenko. – K.: Nauk. Dumka. – 1972. – 62 s.
3. Sirenko, L. A. «Tsveteniye» vody i evtrofirovaniye / J.I.A. Sirenko, M. YA. Gavrilenko. – K.: Nauk. Dumka. – 1978. – 230 s.
4. Rumyantsev, V.A. Tsianobakterial'noye "tsveteniye" vody – istochnik problem prirodopol'zovaniya i stimul innovatsiy v Rossii / Rumyantsev V.A., L.N. Kryukov, SH.R. Pozdnyakov i dr. // Obshchestvo. Sreda. Razvitiye. – 2011. – № 2. – С. 222.
5. Ashikhmina, T.YA. Izuchenije protsessov evtrofifikatsii prirodnykh i iskusstvenno sozdannykh vodoyomov (literaturnyy obzor) / T.YA. Ashikhmina, T.I. Kutyavina, Ye.A. Domnina // Teoreticheskiye problemy ekologii. – 2014. – № 3. – С. 6–13.

6. *Sukharevich, V. I. Global'noye rasprostraneniye tsianobakteriy: prichiny i posledstviya (obzor)* / V. I. Sukharevich, YU.M. Polyak // Biologiya vnutrennikh vod. – 2020. – № 6. – S. 562–572.
7. 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. – V. 92. – 101586. DOI:10.1016/j.hal.2019.03.004.
8. *Datsenko, Y.U.S. Evtrofirovaniye vodokhranilishch: gidrologo-gidrokhimicheskiye aspekty*. – 2007. – M.: GEOS. – 252 s.
9. *Umanskaya, M.V. Tsianobakterial'nyye tsveteniya vody v presnovodnykh kontinental'nykh vodoyemakh: obzor* / M.V. Umanskaya, M.YU. Gorbunov, N.G. Tarasova // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. – 2023. – Т. 25. – № 5. – S. 182–194.
10. Kuybyshevskoye vodokhranilishche (nauchno-informatsionnyy spravochnik) / otv. red. G. S. Rozenberg, L. A. Vykhristyuk. Tol'yatti: Institut ekologii Volzhskogo basseyna RAN. – 2008. – 123 s.
11. *Bespalova, K.V. Povysheniye temperatury vody Kuybyshevskogo vodokhranilishcha i riski vodopol'zovaniya* / K.V. Bespalova, A.V. Selezneva, V.A. Seleznev // Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye. – 2023. – № 3. – S. 49–62.
12. Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshcheye rezyume. SPb.: Naukoyemkiye tekhnologii. – 2022. – 124 s.
13. Izmeneniya klimata: prichiny, riski, posledstviya, problemy adaptatsii i regulirovaniya / pod red. akademika RAN I.I. Mokhova, chlena-korrespondenta RAN A.A. Makosko, k.f.-m.n. A.V. Chernokul'skogo. – M.: RAN. – 2024. – 360 s.
14. *Perevedentsev, Y.U.P. Klimaticheskiye izmeneniya na territorii Privolzhskogo federal'nogo okruga v XX–XXI vekakh i ikh posledstviya dlya agrosfery* / Y.U.P. Perevedentsev, K.M. Shantalinskiy, Mirsayeva, A.A. Nikolayev, Y.U.P. Perevedentsev, K.M. Shantalinskiy, N.A. Mirsayeva, A.A. Nikolayev, T.R. Aukhadeyev, V.V. Gur'yanov, B.G. Sherstyukov // Meteorologiya i gidrologiya. – 2023. – № 9. – S. 86–99.
15. *Perevedentsev, Y.U.P. Izmeneniya klimata na territorii Respubliki Tatarstan* / Y.U.P. Perevedentsev, K.M. Shantalinskiy, N.A. Mirsayeva i dr. // Geograficheskiy vestnik. – 2024. – № 1(68). – S. 103–112. DOI:10.17072/2079-7877-2024-1-103-112.
16. *Yan, X., Xu, X., Wang, M., Wang, G., Wu, S., Li, Z., Sun, H., Shi, A., Yang, Y. Climate warming and cyanobacteria blooms: Looks at their relationships from a new perspective*. – 2017. DOI:10.1016/j.watres.2017.09.008.
17. *Bertani I., Primicerio R., Rossetti G. Extreme climatic event triggers a lake regime shift that propagates across multiple trophic levels* // Ecosystems. – 2016. – V. 19. Is 1. – P. 16–31. DOI:10.1007/s10021-015-9914-5.
18. *Selezneva, A.V. Massovoye razvitiye vodorosley na vodokhranilishchakh r. Volgi v usloviyakh malovod'ya* / A.V. Selezneva, V.A. Seleznev, K.V. Bespalova // Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal. – 2014. – № 1. – S. 88–96.
19. *Antropogennyye vozdeystviya na vodnyye resursy Rossii i sopredel'nykh gosudarstvakh v kontse XX stoletiya* / otv. red. N. I. Koronkevich, I. S. Zaytseva. – M.: Nauka. – 2003. – 367 s.
20. *Litvinov, A.S. Termicheskiy rezhim Rybinskogo vodokhranilishcha pri global'nom poteplenii* / A.S. Litvinov, A.V. Zakonnova // Meteorologiya i gidrologiya. – 2012. – № 9. – S. 91–96.
21. *Selezneva, K.V. Transformatsiya termicheskogo rezhima Kuybyshevskogo vodokhranilishcha na fone global'nogo potepleniya klimata* / K.V. Selezneva, A.V. Selezneva, V.A. Seleznev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. – 2023. – № 3. – S. 57–67.
22. *Selezneva K. V., Selezneva A. V., and Seleznev V. A. The impact of thermal regime on chlorophyll content in the southern part of the Kuibyshev reservoir* BIO Web of Conferences. – 2025. – T. 160. – P. 02036.
23. *Kosten S., Huszar V., Becares E. et al. Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes* // Glob. Change Biol. – 2012. – V. 18. – P. 118.
24. *Canale R.P., Vogel A.H. Effect of temperature on phytoplankton growth* // Journal of the Environmental Engineering Division of the American Society of Civil Engineers. – 1974. – P. 229–241.
25. *Paerl H.W., Paul V.J. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria*. Water Res. – P. 2012. – V. 46. – P. 1349.
26. *Kopylov, A. I. Sezonnyye i mezhgodovyye kolebaniya pervichnoy produktsii fitoplanktona v Rybinskom vodokhranilishche: vliyaniye pogodnykh i klimaticeskikh izmeneniy* / A.I. Kopylov, T.S. Maslennikova, D.B. Kosolapov // Vodnyye resursy. – 2019. – № 46(3). – S. 270–277.
27. *Mineyeva, N.M. Soderzhaniye khlorofilla a v yedinitse biomassy fitoplanktona (obzor)* / N.M. Mineyeva, L.A. Shchur // Al'gologiya. – 2012. – T. 22. – № 4. – S. 423–437.
28. *Datsenko, Y.U.S. Analiz vliyaniya abioticheskikh faktorov na razvitiye fitoplanktona v maloprotochnem stratifitsirovannom vodokhranilishche* / Y.U.S. Datsenko, V.V. Puklakov, K.K. Edel'shteyn // Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. – 2017. – № 10. – S. 73–85.
29. *Mineeva, N.M. Abioticheskie faktory i ikh rol' v razvitiii fitoplanktona Volgi. Vodohraniliša srednej Volgi* / N.M. Mineeva, S.A. Poddubnyj, I.É. Stepanova, A.I. Cvetkov // Biologiya vnutr. vod. – 2022. – № 6. – S. 640–651. DOI:10.31857/S0320965222060158.
30. *Litvinov, A.S. Kharakteristika hidrologicheskikh usloviy i raspredeleniya fitoplanktona v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada* / A.S. Litvinov, N.M. Mineyeva // Vodnyye resursy. – 1997. – T. 24. – № 4. – S. 486–490.
31. *Litchman E., Thomas M. K. Effects of temperature and nitrogen availability on the growth of invasive and native cyanobacteria* // Hydrobiologia. – 2015. DOI:10.1007/s10750-015-2390-2.
32. *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. – V. 8. – № 10. – P. 427. DOI:10.3390/w8100427
33. *Pautova, V.N. Dinamika soderzhaniya khlorofilla «a» v fitoplankton Kuybyshevskogo vodokhranilishcha* / V.N. Pautova, V.I. Nomokonova // Gidrobiologicheskiy zhurnal. – 2002. – T. 38. – № 6. – S. 3–9.
34. *Mineyeva, N.M. Soderzhaniye khlorofilla i sovremennoye troficheskoye sostoyaniye vodokhranilishch Volgi (2019–2020 gg.)* / N.M. Mineyeva, I.V. Semadeni, V.V. Solov'yeva, O.S. Makarova // Biologiya vnutr. vod. – 2022. – № 4. – S. 367–371. DOI: 10.31857/S0320965222040210

Alexandra Selezneva, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory for Monitoring Water Bodies. E-mail: alek.selezneva@mail.ru

Vladimir Seleznev, Chief Researcher of the Laboratory for Monitoring Water Objects. E-mail: seleznev53@mail.ru