

Повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища и риски водопользования

К.В. Селезнева^{1,2}  , А.В. Селезнева¹ , В.А. Селезнев¹ 

 seleznev53@mail.ru

¹ *Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, г. Тольятти, Россия*

² *Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изменение термического режима Куйбышевского водохранилища влияет на функционирование водной экосистемы и формирование качества воды, а его оценка в условиях глобальных климатических изменений крайне важна, т. к. водоем используется для ведения рыбного хозяйства, хозяйственно-питьевого водоснабжения и рекреации. Представлена количественная оценка изменений поверхностной температуры воды Куйбышевского водохранилища и смещений дат перехода температуры воды при прогреве весной и охлаждении осенью в условиях глобального потепления климата. **Методы.** Для исследования использованы архивные и современные данные синхронных наблюдений за приземной температурой воздуха и поверхностной температурой воды Куйбышевского водохранилища. Для оценки изменения температуры выбраны два периода: современный (2015–2021 гг.) и исторический (1957–1980 гг.) **Результаты.** Установлено, что изменение термического режима Куйбышевского водохранилища обусловлено глобальным потеплением климата. За последние семь лет наметилась устойчивая тенденция повышения температуры поверхностного слоя воды в прибрежной зоне, средняя температура воды в апреле–ноябре увеличилась на 1,6 °С по сравнению с историческим периодом. Установлено, что водохранилище быстрее нагревается и медленнее охлаждается. В современный период наблюдается повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища и смещение дат перехода температуры воды через контрольные значения (0,2; 4,0; 10,0 °С), что обусловлено повышением температуры воздуха из-за глобального потепления климата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Волга, водохранилище, глобальное потепление, температура воздуха, температура воды, трансформация сезонов, риски водопользования.

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

Для цитирования: Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища и риски водопользования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 49–62. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_4.

Дата поступления 17.04.2023.

AN INCREASE IN THE KUIBYSHEV RESERVOIR WATER TEMPERATURE AND THE RISKS OF WATER USE

Ksenia V. Selezneva^{1,2}  , Aleksandra V. Selezneva¹ , Vladimir. A. Seleznev¹ 

 seleznev53@mail.ru

¹ *Institute of Ecology of the Volga Basin RAS – branch of the Samara Federal Research Center RAS, Russian Federation*

© К.В. Селезнева, А.В. Селезнева, В.А. Селезнев, 2023

² Togliatti State University, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. The change in the thermal regime of the Kuibyshev reservoir affects the functioning of the aquatic ecosystem and the formation of water quality, and its assessment in the context of global climate change is extremely important, since the reservoir is used for fisheries, drinking water supply and recreation. The article presents quantitative estimation of the Kuibyshev Reservoir surface water temperature and shifts in the dates of transition of water temperature during warming in spring and cooling in autumn in the context of global warming. **Methods.** For the study, archival and current data of synchronous observations of surface air temperature and surface water temperature of the Kuibyshev Reservoir have been used. Two periods: current (2015–2021) and historical (1957–1980) ones have been chosen to assess the temperature change. **Results.** It has been established that the change in the thermal regime of the Kuibyshev Reservoir is due to global climate warming. In the modern period, over the past 7 years, there has been a steady trend of increasing the temperature of the surface layer of water in the coastal zone of the reservoir, the average water temperature for the ice-free period (April–November) increased by 1.6 °C compared to the historical period. It has been stated that the reservoir heated up faster and cooled more slowly. In the modern period, there is an increase in the water temperature of the Kuibyshev Reservoir and a shift in the control dates for the transition of the water temperature through the control values (0.2; 4.0; 10.0 °C), which is due to an increase in air temperature due to global warming.

Keywords: Volga, reservoir, global warming, air temperature, water temperature, transformation of seasons, water use risks.

Financing: The work was carried out within the framework of the state task (registration number 1021060107175-5-1.6.19).

For citation: Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. The increase in the Kuibyshev Reservoir water temperature and the risks of water use. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 49–62. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_4.

Received 17.04.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Термический режим оказывает существенное влияние на функционирование водных экосистем и формирование качества воды крупных водохранилищ Волги, используемых для нужд рыбного хозяйства, питьевого водоснабжения и рекреации [1–7]. Оценка трансформации термического режима водных экосистем в условиях глобального потепления климата [8, 9] имеет важное научное и практическое значение.

Один из важнейших показателей глобального потепления климата – тренд на повышение температуры приземного слоя атмосферы. По данным Росгидромета за последние 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 1970-х годов каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего¹. Особого внимания заслуживает семилетний период (2015–2021 гг.). По данным Всемирной метеорологической организации, 2021 г. стал седьмым годом подряд, начиная с 2015 г., когда глобальная температура воздуха была выше на 1 °C до индустриального уровня (1850–1900 гг.).

¹ Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2007. М.: Росгидромет. 2008. 164 с.

Наблюдаемое на территории России повышение температуры воздуха приводит к изменению состояния рек, озер и водохранилищ [10–12]. Установлены последствия влияния потепления климата на изменение водных ресурсов в крупнейших речных бассейнах² [13–16]. В Волжском бассейне с 1970–1980-х годов наблюдается повышение водности рек на 10–15 % за счет увеличения стока в зимнюю и летне-осеннюю межень³ [16]. Наряду с этим, недостаточно внимания уделяется изучению влияния глобального потепления климата на трансформацию термического режима и, как следствие, на экологическое состояние крупных равнинных водохранилищ с замедленным водным обменом. Существует ограниченное количество исследований по этому направлению.

На Верхней Волге на Рыбинском водохранилище проведены исследования изменений температуры поверхностного слоя воды. Выявлены и оценены линейные тренды. 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 [17]. На водохранилищах Средней и Нижней Волги установлено, что в жаркие и маловодные годы при повышении температуры воды в период летней межени наблюдается ухудшение кислородного режима, увеличение биологической продуктивности цианобактерий, рост органического загрязнения, что негативно влияет на функционирование водных экосистем и формирование качества воды [5, 6, 15].

Существует и противоположная точка зрения о влиянии климатических изменений на экологическое состояние водных объектов. В частности, отмечается, что повышенная увлажненность в последние десятилетия и потепление климата, сопровождающееся увеличением годовой температуры воды на 0,2–0,3 °C, способствовали лучшему самоочищению рек и водоемов [12].

Для водных экологических исследований в бассейне Волжско-Камских водохранилищ крайне важно оценить влияние повышения температуры приземного слоя атмосферы на формирование термического режима водоемов. Необходимо продолжить исследования по оценке влияния климатических изменений на состояние водохранилищ. В качестве объекта исследований выбрано самое крупное в Волжско-Камском каскаде – Куйбышевское водохранилище. Основная цель проведенной работы – дать количественную оценку современных изменений поверхностной температуры воды водохранилища и определить смещение дат перехода температуры воды при прогреве весной и охлаждении осенью через контрольные значения (0,2; 4,0; 10,0 °C) в условиях глобального потепления климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Куйбышевское водохранилище расположено в центре Волжского бассейна (рис. 1). Оно создано в 1957 г. в результате перекрытия Волги Жигулевской плотиной (замыкающий створ). Входными створами являются: на волжской ветке – Чебоксарская плотина; на камской ветке – Нижнекамская плотина.

² Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2009 год. М.: Росгидромет. 2010. 57 с.

³ Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленные влиянием климатических факторов. Рекомендации по расчету. СПб.: ФГБУ ГГИ. 2017. 42 с.

Общая длина водохранилища с учетом волжской и камской веток составляет 750 км, площадь акватории при нормальном подпорном уровне – 6450 км² [18], средняя глубина – 9 м [19], а максимальная – 50 м (по результатам экспедиционных исследований в октябре 2022 г.).



Рис. 1. Расположение гидроузлов и гидрологических пунктов наблюдений (Δ); гидроузлы: 1 – Чебоксарский, 2 – Нижнекамский, 3 – Жигулевский.
 Fig. 1. Location of hydroelectric facilities and hydrological observation points (Δ) (hydraulic units: 1 – Cheboksary, 2 – Nizhnekamsk, 3 – Zhigulevsky).

Изучение пространственной неоднородности и временной изменчивости температуры воды на водохранилище проводится с момента его создания⁴. Поверхностная температура воды на гидрологических постах, равномерно расположенных по длине водоема (рис. 1), систематически измеряется в прибрежной зоне водохранилища два раза в сутки (в 8 и 20 ч). Измерения осуществляются поверхностным (родниковым) термометром в оправе Шпиндлера на глубине не менее 1 м. Цена деления термометра 0,2 °С, что позволяет определять температуру воды с точностью до 0,1 °С.

Анализ архивных материалов Росгидромета показывает, что, несмотря на значительную протяженность Куйбышевского водохранилища, температура воды меняется незначительно. Средняя температура (t_{cp}) за теплый период (апрель–ноябрь) на разных участках водохранилища составляет 11,0–12,1 °С (табл. 1). Наибольший прогрев воды наблюдается в мелководном Черемшанском заливе (г. Дмитровград), где средняя температура воды – 12,7 °С.

⁴ Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 24. Бассейны рек Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 520 с.

Таблица 1. Температура воды на гидрологических постах Куйбышевского водохранилища, °С
Table 1. Water temperature at the Kuybyshev Reservoir hydrological posts, °С

Гидрологический пост	Месяц								t _{ср}
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Основная акватория водохранилища									
с. Вязовые	2,2	12,0	17,0	21,0	19,7	14,4	6,5	0,9	11,7
с. Соколы Горы	0,4	10,8	16,6	20,8	19,2	13,7	5,6	0,6	11,0
г. Тетюши	1,2	11,0	17,4	21,1	19,9	14,8	6,9	1,0	11,7
г. Сенгилей	1,3	10,1	17,3	20,6	20,2	15,9	8,8	2,1	12,0
г. Тольятти	0,8	7,9	16,6	20,5	20,3	16,8	10,2	3,5	12,1
Черемшанский залив									
г. Димитровград	3,9	14,6	19,8	22,4	20,3	14,2	5,8	0,7	12,7

По длине водохранилища температура воды с севера на юг повышается на 1,1 °С. В северной части по волжской ветке (с. Вязовые) она составляет 11,7 °С, а по камской ветке (с. Соколы Горы) – 11,0 °С (табл. 1). Температура камской воды на 0,7 °С ниже температуры волжской. В южной части водохранилища (г. Тольятти) температура воды выше, чем в северной и составляет 12,1 °С, что превышает температуру камской воды (с. Соколы Горы) на 1,1 °С и температуру волжской воды (с. Вязовые) на 0,4 °С.

В сезонном разрезе значительные изменения температуры воды по длине водохранилища отмечены весной и осенью, наименьшие – летом (табл. 1). В мае разница температур между северной и южной частями водохранилища составляет 4,1 °С, в октябре – 4,6 °С. Летом разница температур сокращается: в июне она составляет 0,8 °С; в июле – 0,6 °С и в августе – 1,1 °С. Наибольший прогрев воды наблюдается в июле (средняя месячная температура 20,5–21,1 °С).

Для количественной оценки влияния климатических изменений на термический режим Куйбышевского водохранилища выбран стационарный пункт наблюдений (г. Тольятти), который бесперебойно функционирует 65 лет. На протяжении всего периода наблюдения осуществляются по единой методике, что позволяет получать достоверные оценки многолетних изменений температуры воды водохранилища за теплый период (апрель–ноябрь).

Для сравнительного анализа временных рядов выбран эмпирический метод, основанный на обработке имеющихся данных гидрометеорологических наблюдений. Сравнивали два периода: исторический и современный. Исторический период простирается от 1950-х до конца 1970-х годов. Для бассейна Волги рубеж 1970–1980-х годов характеризует начало климатических изменений гидрологических характеристик³. Наиболее существенные климатические изменения, в частности глобальное повышение температуры воздуха, зафиксированы в современный период с 2015 по 2021 гг. Для сравнения двух периодов использованы данные о средних месячных, наибольших и наименьших значениях температуры воды и датах перехода через контрольные значения температуры воды – 0,2; 4,0; 10,0 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ данных многолетних наблюдений показывает, что за последние семь лет температура воздуха на метеостанции Тольятти увеличилась (рис. 2). В современный период (2015–2021 гг.) средняя температура воздуха ($T_{\text{ср}}$) за апрель–ноябрь составила 13,6 °С, что на 2,1 °С выше соответствующей температуры исторического периода (1952–1979 гг.). Основной вклад в увеличение средней годовой температуры привносит летний период (рис. 2). Наибольшая температура воздуха ($T_{\text{наиб}}$) не изменилась, а наименьшая ($T_{\text{наим}}$) существенно увеличилась с 7,5 °С до 11,8 °С.

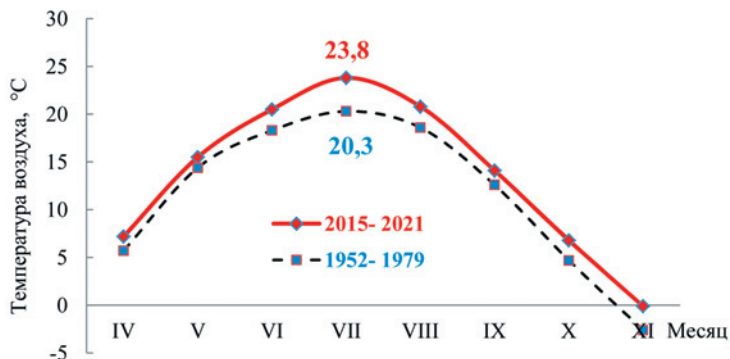


Рис. 2. Температура воздуха в современный и исторический периоды.
Fig. 2. Air temperature in the current and historical periods.

В современный период самым жарким оказался 2021 г., когда средняя температура воздуха с апреля по ноябрь достигла отметки 15,0 °С и превысила значение $T_{\text{ср}}$ исторического периода на 3,5 °С (табл. 2).

В июле наблюдалась самая высокая $T_{\text{ср}}$, которая составила 24,6 °С и превысила июльское значение исторического периода на 4,3 °С. В течение всего июля средняя суточная температура воздуха 15 раз (половина месяца) превышала значение 25 °С, а максимальные значения в суточном режиме превышали 30 °С и составляли 32–39 °С. Повышение температуры воздуха в современный период привело к увеличению поверхностной температуры воды Куйбышевского водохранилища. Анализ данных многолетних наблюдений на гидрологическом посту г. Тольятти показал, что средняя температура воды ($t_{\text{ср}}$) за современный период составила 13,7 °С и увеличилась на 1,6 °С по отношению к историческому периоду (табл. 3).

В современный период наибольшая температура воды ($t_{\text{наиб}}$) составила 15,5 °С и незначительно отличалась от значения $t_{\text{наиб}}$ в исторический период (15,3 °С). А вот наименьшая температура воды ($t_{\text{наим}}$) существенно увеличилась – с 9,5 °С до 11,8 °С. Следовательно, увеличение средней температуры воды ($t_{\text{ср}}$) в современный период произошло за счет повышения наименьших температур воды ($t_{\text{наим}}$).

В сезонном разрезе максимальное увеличение температуры воды ($t_{\text{ср}}$) в современный период отмечено в июле (рис. 3), когда температура воды составляла 22,5 °С и на 2,0 °С превышала подобное значение для исторического периода. Минимальное увеличение температуры воды наблюдалось в апреле – 0,7 °С.

Таблица 2. Температура воздуха за современный и исторический период, °С
Table 2. Air temperature for current and historical periods, °C

Температура воздуха	Месяц								Среднее значение
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Современный период									
T_{2015}	6,9	13,2	20,2	23,8	15,2	14,2	2,5	-0,2	12,0
T_{2016}	8,3	14,9	20,3	23,6	24,1	14,3	5,4	-2,1	13,6
T_{2017}	6,8	13,1	18,5	22,2	22,6	14,2	6,4	2,8	13,3
T_{2018}	6,2	15,8	20,3	24,2	21,7	16,3	8,6	-1,5	14,0
T_{2019}	7,0	17,0	22,4	23,2	18,3	12,7	9,6	-0,4	13,7
T_{2020}	7,5	15,4	18,9	25,3	19,5	14,4	8,1	-0,7	13,6
T_{2021}	7,8	19,1	22,9	24,6	24,0	12,8	7,0	1,6	15,0
$T_{\text{ср}}$	7,2	15,5	20,5	23,8	20,8	14,1	6,8	-0,1	13,6
$T_{\text{наиб}}$	8,3	19,1	22,4	25,3	24,1	16,3	9,6	2,8	16,1
$T_{\text{наим}}$	6,2	13,1	18,5	22,2	18,3	12,7	5,4	-2,1	11,8
Исторический период									
$T_{\text{ср}}$	5,7	14,4	18,3	20,3	18,6	12,6	4,7	-2,6	11,5
$T_{\text{наиб}}$	12,4	19,8	21,1	23,8	23,3	17,5	9,6	1,4	16,1
$T_{\text{наим}}$	1,5	9,9	15,6	17,2	16,6	8,6	-2,1	-7,1	7,5

Таблица 3. Температура воды по данным гидрологического поста Тольятти, °С
Table 3. Water temperature according to the hydrological post of Togliatti, °C

Температура воды	Месяц								Средне значение
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Современный период									
t_{2015}	1,0	8,3	19,0	22,5	20,1	18,4	11,0	4,7	13,0
t_{2016}	2,3	11,5	19,5	22,6	24,1	18,2	12,2	3,7	14,3
t_{2017}	1,1	8,6	15,2	20,0	22,3	19,2	11,7	5,7	13,0
t_{2018}	0,1	7,8	16,2	23,4	22,8	19,7	13,0	5,3	13,5
t_{2019}	1,7	10,1	20,3	21,6	19,7	16,7	12,9	7,2	13,8
t_{2020}	3,1	10,4	17,9	23,0	21,2	17,9	12,8	5,9	14,0
t_{2021}	1,1	9,8	20,7	24,3	24,2	18,2	11,7	5,0	14,4
$t_{\text{ср}}$	1,5	9,5	18,4	22,5	22,1	18,3	12,2	5,4	13,7
$t_{\text{наиб}}$	3,1	11,5	20,7	24,3	24,2	19,7	13,0	7,2	15,5
$t_{\text{наим}}$	0,1	7,8	15,2	20,0	19,7	16,7	11,0	3,7	11,8
Исторический период									
$t_{\text{ср}}$	0,8	7,9	16,6	20,5	20,3	16,8	10,2	3,5	12,1
$t_{\text{наиб}}$	2,3	12,5	19,3	24,4	22,6	19,8	14,2	7,1	15,3
$t_{\text{наим}}$	0,1	3,5	13,6	17,5	18,5	14,2	7,7	0,8	9,5

За современный период наиболее существенно температура воды повысилась в 2021 г. Средняя температура воды ($t_{\text{ср}}$) за безледоставный период составила 14,4 °С и превысила показатель исторического периода на 2,3 °С. В июле она достигла 24,3 °С, что на 3,8 °С превысило подобное значение исто-

рического периода. В течение июля 2021 г. средняя суточная температура воздуха превышала 22 °С и изменялась в пределах 22,1–26,5 °С. В период с 18 по 22 июля вода прогрелась до 25,3–26,5 °С, превысив предыдущие рекордные показатели на 0,1–1,3 °С.

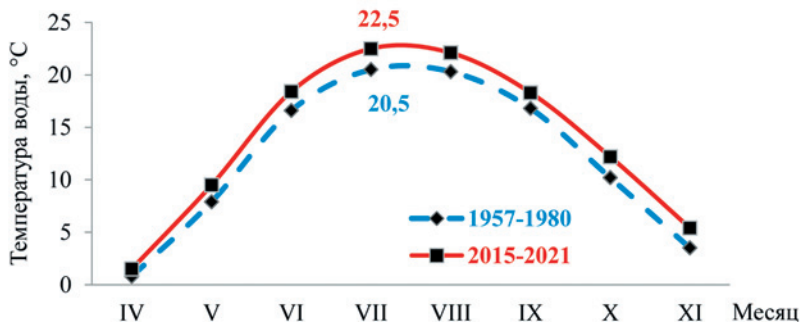


Рис. 3. Температура воды в современный и исторический периоды.
Fig. 3. Water temperature in the current and historical periods.

Совместный анализ сезонного хода температуры воздуха и воды в самом жарком 2021 г. показывает, что выделяются три периода (рис. 4):

– I период (апрель–май) весеннего нагревания воды, когда температура воздуха выше температуры воды и при отсутствии ветра создаются благоприятные условия для формирования термоклина, в котором температура воды понижается с глубиной более резко, чем в нижележащих слоях;

– II период (июнь–август) летней квазистационарности, когда температура воды практически не меняется и хорошо согласуется с температурой воздуха, это период наибольших температур воды и благоприятных условий для развития цианобактерий;

– III период (сентябрь–ноябрь) осеннего охлаждения, когда температура воздуха ниже температуры воды и создаются условия для конвективного перемешивания водных масс.

Летний период II является самым неблагоприятным для формирования кислородного режима воды из-за высоких температур и массового развития цианобактерий. Летом 2021 г. средняя месячная температура воздуха в июле и августе составила 24,6 °С и 24,0 °С, температура воды – 24,3 °С и 24,2 °С соответственно. Довольно часто средняя суточная температура воздуха превышала 30 °С, а температура воды – 27 °С (рис. 4). При такой высокой температуре воды даже равновесная концентрация растворенного кислорода составляет всего 7,7–7,9 мгО/дм³.

Дальнейшее летнее понижение содержания растворенного кислорода в воде водохранилища связано с активизацией массового развития цианобактерий при высоких температурах воды. В безветренную погоду на поверхности воды из-за фотосинтезирующей аэрации образуется тонкая перенасыщенная кислородом пленка, препятствующая абсорбции кислорода из атмосферы. В отсутствие турбулентного перемешивания снижается поступление растворенного кислорода с поверхности водоема в нижележащие слои воды. Из-за интенсивного потребления кислорода на минерализацию органиче-

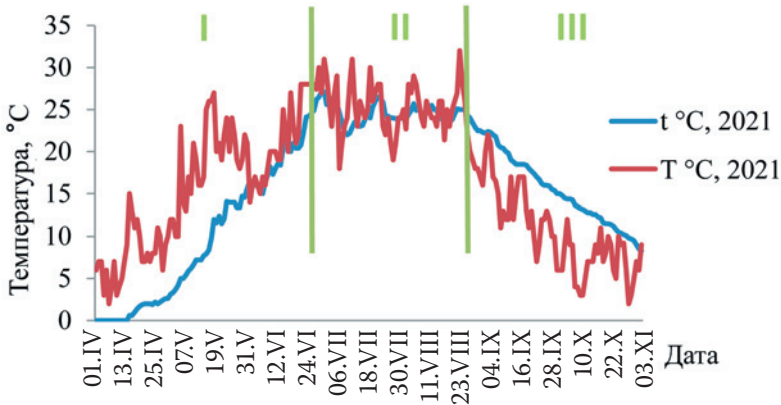


Рис. 4. Три периода (I, II, III) в сезонном ходе температуры воздуха и воды.
Fig. 4. Three periods (I, II, III) in the seasonal course of air and water temperature.

ских веществ содержание фактического кислорода меньше равновесного на 2,0–2,5 мгО/дм³ [6]. Следовательно, содержание фактического растворенного кислорода в воде Куйбышевского водохранилища меньше допустимой нормы, которая составляет 6,0 мгО/дм³. Дефицит растворенного кислорода замедляет процессы самоочищения и создает условия для замора рыбы.

В современный период, наряду с ростом температуры воды, наблюдалось смещение дат устойчивого перехода температуры воды весной и осенью через контрольные значения (табл. 4). По сравнению с историческим периодом увеличилась продолжительность теплого сезона. Количество дней, для которых температура воды (t_{cp}) превышала 0,2 °С, возросло с 231 до 245; с 192 до 207 с превышением t_{cp} более 4,0 °С; с 163 до 169 дней, для которых t_{cp} превышала 10,0 °С.

Средние даты весеннего перехода температуры воды через контрольные значения в современный период сдвинулась по отношению к историческому на более ранние сроки (табл. 4). В весенний период даты перехода температуры воды через контрольные значения стали наступать раньше: для значения 0,2 °С – на 11 дней; для 4,0 °С – на 2 дня; для 10,0 °С – на 5 дней. В осенний период, напротив, даты перехода наступают позднее: для значения 10,0 °С – на 10 дней; для 4,0 °С – на 10 дней; для 0,2 °С – на 6 дней.

Наблюдаемое в 2016–2021 гг. увеличение температуры воды на 1,5–2,0 °С активизировало процесс массового развития цианобактерий на Куйбышевском водохранилище. Это видимая невооруженным глазом составная часть более глобального процесса – антропогенного эвтрофирования водоема. Особенно ярко как на акватории, так и в прибрежной части водохранилища он проявляется в жаркие и маловодные периоды, когда видовое разнообразие планктона сокращается, доминируют цианобактерии. При этом численность и биомасса цианобактерий увеличивается, а зоопланктона – уменьшается.

Как известно, цианобактерии или синезеленые водоросли – это значительная группа крупных бактерий, способных к фотосинтезу, сопровождающемуся выделением кислорода. При оптимальных условиях (температура воды более 22 °С, наличие биогенных веществ и отсутствие турбулентного перемешивания) взросление одноклеточных цианобактерий длится 12 ч. Как следствие,

Таблица 4. Даты устойчивого перехода температуры воды на посту г. Тольятти
 Table 4. Dates of stable transition of water temperature at the post in Togliatti

Температура воды	Дата перехода t весной			Дата перехода t осенью		
	0,2 °C	4,0 °C	10,0 °C	10,0 °C	4,0 °C	0,2 °C
Современный период						
t ₂₀₁₅	04.04	29.04	23.05	20.10	19.11	19.12
t ₂₀₁₆	02.04	25.04	10.05	26.10	17.11	04.12
t ₂₀₁₇	02.04	01.05	26.05	25.10	01.12	18.12
t ₂₀₁₈	21.04	07.05	18.05	31.10	22.11	28.11
t ₂₀₁₉	11.04	24.05	14.05	03.11	27.11	14.12
t ₂₀₂₀	19.03	23.04	18.05	29.10	21.11	03.12
t ₂₀₂₁	14.04	03.05	17.05	26.10	21.11	15.12
t _{ср}	06.04	04.05	18.05	27.10	23.11	10.12
t _{ранняя}	19.03.20	23.04.20	10.05.16	25.10.17	17.11.16	28.11.18
t _{позняя}	21.04.18	07.05.18	26.05.17	03.11.19	01.12.17	18.12.17
Исторический период						
t _{ср}	17.04	06.05	23.05	17.10	13.11	04.12
t _{ранняя}	03.04.66	25.04.75	11.05.75	04.10.58	29.10.76	18.11.76
t _{позняя}	12.05.69	17.05.69	05.06.69	06.11.74	29.11.74	16.12.71,74

за вегетационный период происходит их лавинообразное размножение и резко повышается экспорт метаболитов в окружающую среду.

Отдельные представители цианобактерий способны продуцировать токсины, некоторые из цианотоксинов сопоставимы по уровню токсичности с тетродотоксином, ядами кобры и гремучей змеи. Наиболее известный – микроцистин-LR. Всемирная организация здравоохранения установила ориентировочную допустимую концентрацию микроцистина-LR в питьевой воде не более 1 мкг/дм³.

Массовое развитие цианобактерий оказывает негативное влияние на формирование гидрохимического режима и вызывает риски в сфере хозяйственно-питьевого водоснабжения, культурно-бытового водопользования, ведения рыбного хозяйства и рекреации.

Риски хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. В период массового развития цианобактерий в источнике водоснабжения – Куйбышевском водохранилище – качество воды резко ухудшается. Вода приобретает неприятный запах и специфический вкус, увеличиваются цветность и рН. По интегральным показателям органического загрязнения (ХПК, ПО, БПК) вода не соответствует санитарно-гигиеническим требованиям. В результате возникают серьезные проблемы обеспечения населения качественной питьевой водой. Для решения данной водохозяйственной проблемы потребуется модернизация технологических схем и процессов доочистки воды на городских станциях водоподготовки до нормативного уровня.

Риск рыбохозяйственного водопользования. Важнейшим аспектом негативного воздействия процесса массового развития цианобактерий на газовый режим водохранилища является трансформация сезонного хода содержания растворенного кислорода в водной массе. В летний период наблюдается де-

фицит кислорода, в придонных горизонтах его содержание опускается ниже критического уровня (менее 2 мг/дм³). В глубоководной пойме образуются гипоксидные зоны и ухудшаются условия обитания гидробионтов. В результате наносится ущерб водным биологическим ресурсам, снижается вылов промысловых видов рыб (лещ, судак, берш, окунь, чехонь, сом).

Для прогноза экологического состояния Куйбышевского водохранилища необходимо исследовать механизмы формирования кислородного режима в условиях массового развития цианобактерий. Выдвигается рабочая гипотеза, согласно которой на поверхности водоема во время «цветения» воды образуется очень тонкий слой (1–3 см) воды, в котором насыщение кислородом достигает 150–200 %. Перенасыщение образуется из-за фотосинтезирующей аэрации цианобактериями. При отсутствии перемешивания водных масс этот слой частично или полностью препятствует поступлению кислорода из атмосферы в водоем. Дефициту кислорода способствует и биохимическое потребление кислорода на окисление органических веществ, о чем свидетельствуют высокие значения БПК, превышающие допустимые нормативы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ данных многолетних наблюдений показал, что глобальное потепление климата трансформирует термический режим Куйбышевского водохранилища. В современный период средняя температура воздуха за теплый период (апрель–ноябрь) по данным метеостанции Тольятти увеличилась на 2,1 °С по сравнению с историческим периодом. Повышение температуры воздуха обусловило рост поверхностной температуры воды Куйбышевского водохранилища в теплый период на 1,6 °С, с 12,1 до 13,7 °С. Наиболее значительно температура воды повысилась в 2021 г., когда в июле она достигла 24,3 °С и превысила подобное значение исторического периода на 3,8 °С.

Продолжительность теплого периода увеличилась по сравнению с историческим периодом. Количество дней между весенними и осенними переходами температуры воды через контрольные значения (0,2; 4,0; 10,0 °С) возросло на 17 дней для значения 0,2 °С, на 12 – для значения 4 °С, на 15 дней для значения 10 °С. Водохранилище быстрее нагревается и медленнее охлаждается. Весенний переход температуры воды через значения 0,2; 4,0; 10,0 °С наступает раньше на 11, 2 и 5 дней соответственно, а обратный осенний переход осуществляется позднее на 10, 10 и 6 дней.

Наблюдаемые в 2015–2021 гг. повышение поверхностной температуры воды и увеличение продолжительности теплого периода активизируют процессы массового развития цианобактерий в воде Куйбышевского водохранилища. Увеличение интенсивности и продолжительности этого процесса оказывает негативное влияние на трансформацию гидрохимического режима и вызывает дополнительные риски в сфере хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, ведения рыбного хозяйства и обеспечения рекреации.

Для снижения рисков водопользования в условиях глобального потепления климата потребуется:

– организация научных исследований, направленных на регулирование процессов массового развития цианобактерий для минимизации негативных последствий на качество воды в водохранилищах Волги;

– разработка научно обоснованных превентивных мероприятий по снижению биогенной нагрузки на водные объекты Волжского бассейна от точечных и диффузных источников загрязнения, а также методов прямого воздействия на цианобактерии для снижения их численности и биомассы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даденко Ю.С., Эдельштейн К.К., 2021. Влияние температуры воды на развитие фитопланктона в водохранилищах // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции, посвященной 65-летию ИБВВ имени И. Д. Папанина РАН. Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции. Ярославль: Филигрань, 2021. С. 57.
2. Калинин Н.М., Филатов Н.Н., Теканова Е.В., Балаганский А.Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // Региональная экология. 2018. № 2. С. 65–73.
3. 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. № 46(3). С. 270–277.
4. Корнева Л. Г., Соловьева В. В., Митропольская И. В. и др. Многолетняя динамика и распределение фитопланктона крупных равнинных водохранилищ Европейской части РФ // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции, посвященной 65-летию ИБВВ имени И. Д. Папанина РАН. Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции. Ярославль: Филигрань, 2021. С. 102.
5. Селезнев В. А., Селезнева А. В., Беспалова К. В. Антропогенное эвтрофирование крупных водохранилищ Нижней и Средней Волги в условиях глобального потепления климата (проблема и пути решения) // Мат-лы междунар. научно-практ. конф. «Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водных объектов: проблемы и пути решения», 2017. С. 151–156.
6. Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Содержание растворенного кислорода в воде Куйбышевского водохранилища в условиях массового развития водорослей // Вестник ВГУ. Сер. География. Геоэкология. 2022. № 3. С. 97–108. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2022/3/97-108.
7. Слынько Ю.В., Терещенко В.Г. Рыбы пресных вод Понто-Каспийского бассейна (Разнообразие, фауногенез, динамика популяций, механизмы адаптаций). М.: Полиграф-плюс, 2014. 328 с.
8. Бутько М. И., Ефимова Н. А., Лугина К. М. Современное потепление // Метеорология и гидрология. 1993. № 7. С. 29–34.
9. IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.Xia, V.Bex and P.M. Midgley (eds.)]. 2013. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
10. Дмитриева В.А., Нефедова Е. Г. Гидрологическая реакция на меняющиеся климатические условия и антропогенную деятельность в бассейне Верхнего Дона // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 285–297.
11. Селезнева А.В. Оценка диффузного загрязнения Саратовского водохранилища // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 5-2 (85). С. 196–203.
12. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государствах в конце XX столетия / отв. ред. Н. И. Коронкевич, И. С. Зайцева. Москва: Наука. 2003. 367 с.
13. Бэйтс Б.К., Кундцевич З.В., С. У, Ж. П. Палютикоф (ред.). Изменение климата и водные ресурсы. Технический документ Межправительственной группы экспертов по изменению климата, Секретариат МГЭИК. 2008. Женева. 228 с.
14. Селезнева А.В., Беспалова К.В., Селезнев В.А. Изменение водности реки Волги в районе заповедного острова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 31–49. DOI: 10.35567/19994508_2022_4_3.
15. Селезнева А.В., Селезнев В.А., Беспалова К.В. Массовое развитие водорослей на водохранилищах р. Волги в условиях маловодья // Поволжский экологический журнал. 2014. № 1. С. 88–96.
16. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И. А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт. 2008. 600 с.

17. Литвинов А.С., Законнова А.В. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 91–96.
18. Вуглинский В. С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1991. 223 с.
19. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища / под ред. В. А. Знаменского, В. М. Гейтенко. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1978. 269 с.

REFERENCES

1. Datsenko Y.S., Eidelstein K.K., 2021. Water temperature impact upon phytoplankton development in reservoirs. *Sbornik tezisov dokladov Vserossiyskoy konferentsiyi, posvyashchenoy 65-letiyu IBVV imeni I.D. Papanina RAN. Biologiya vodnykh ekosistem v XXI veke: fakty, gipotezy, tendentsiyi* [Collection of the report abstracts of the All-Russian Conference on the occasion of the 65th anniversary of I.D. Papanin IBVV of the RAS. *The aquatic ecosystems biology in XXI century: facts, hypothesis, trends*]. Yaroslavl: Filigran, 2021. P. 57 (In Russ.).
2. Kalinkina N.M., Filatov N.N., Tekanova E.V., Balaganskiy A.F. Many-year dynamics of the iron and phosphorous discharge into the Lake Onega with the Shuya River waters in the conditions of the climate change. *Regionalnaya ekologiya* [Regional ecology]. 2018. No. 2. P. 65–73 (In Russ.).
3. Kopylov A.I., Maslennikova T.S., Kosolapov D.B. Seasonal and inter-year fluctuations of the phytoplankton primary production in the Rybinsk Reservoir: weather and climate changes' impact. *Vodniye resursy* [Water resources]. 2019. No. 46(3). P. 270–277 (In Russ.).
4. Korneva L.G., Solovyeva V.V., Mitropolskaya I.V., et al. Many-year dynamics and distribution of phytoplankton of the European part of the Russian Federation major plain reservoirs. *Sbornik tezisov dokladov Vserossiyskoy konferentsiyi, posvyashchenoy 65-letiyu IBVV imeni I.D. Papanina RAN. Biologiya vodnykh ekosistem v XXI veke: fakty, gipotezy, tendentsiyi* [Collection of the report abstracts of the All-Russian Conference on the occasion of the 65th anniversary of I.D. Papanin IBVV of the RAS. *The aquatic ecosystems biology in XXI century: facts, hypothesis, trends*]. Yaroslavl: Filigran, 2021. P. 102 (In Russ.).
5. Seleznev V.A., Selezneva A.V., Bepalova K.V. Anthropogenic eutrophication in the Lower and Middle Volga River major reservoirs in the situation of the global climate warming (the problem and the ways of its solution). *Materialy mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Globalnoye rasprostraneniye protsessov antropogennogo evtrofirovaniya vodnykh obyektov: problemy i puti resheniya"* [Proceedings of International scientific/practical conference "Global spreading of the water bodies' anthropogenic eutrophication processes: problems and ways of their solution"]. 2017. P. 151–156 (In Russ.).
6. Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. The dissolve oxygen content in the Kuibyshev Reservoir water in the situation of the algae mass development. *Vestnik VGU. Ser. Geografiya. Geokologiya* [VGY newsletter. Series: Geography. Geo/ecology]. 2022. No. 3. P. 97–108. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2022/3/97-108 (In Russ.).
7. Slinko Y.V., Tereshchenko V.G. Fishes of the Ponto-Caspian basin fresh waters (Diversity, fauna-genesis, population dynamics, and mechanisms of adaptation). M.: Poligraf-plyus, 2014. 328 p. (In Russ.).
8. Budyko M.I., Yefimova N.A., Lugina K.M. Current worming. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology]. 1993. No. 7. P. 29–34 (In Russ.).
9. IPCC: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.Xia, V.Bex and P.M. Midgley (eds.)]. 2013. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
10. Dmitriyeva V.A., Nefedova E.G. Hydrological response to the changing climatic conditions and anthropogenic activities in the Upper Don River basin. *Voprosy geografii* [Issues of geography]. 2018. No. 145. P. 285–297 (In Russ.).
11. Selezneva A.V. Assessment of the Saratov Reservoir diffuse pollution. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences Samara Scientific Center]. 2018. V. 20. No. 5-2 (85). P. 196–203 (In Russ.).
12. Anthropogenic impacts upon the water resources of Russia and neighboring states in the late XX century. Responsible Editors: N.I. Koronkevich, I.S. Zaytseva. Moscow: Nauka [Science]. 2003. 367 p. (In Russ.).

13. Baits B.K., Kundtsevich Z.V., S. U, Z. P. Palyutikoff (editor). Climate change and water resources. Technical document of the Intergovernmental Expert group on Climate change. MGEIC Secretariat. 2008. Geneva. 228 p. (In Russ.).
14. Selezneva A.V., Bepalova K.V., Seleznev V.A. The Volga River water content change in the area of the nature reserve island. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020. No. 1. P. 31–49. DOI: 10.35567/19994508_2022_4_3 (In Russ.).
15. Selezneva A.V., Seleznev V.A., Bepalova K.V. Mass development of algae in the Volga River reservoirs under the low-water conditions. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal [Volga ecological journal]*. 2014. No. 1. P. 88–96 (In Russ.).
16. Water resources of Russia and their use. Edited by I.A. Shiklomanov. SPb.: *Gosudarstvenniy gidrologicheskiy institut [State Hydrological Institute]*. 2008. 600 p. (In Russ.).
17. Litvinov A.S., Zakonnova A.V. Thermal regime of the Rybinsk Reservoir during the global warming. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. 2012. No. 9. P. 91–96 (In Russ.).
18. Vuglinskiy V.S. Water resources and water balance of the major reservoirs of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1991. 223 p. (In Russ.).
19. Hydro/meteorological regime of the lakes and the reservoirs of the USSR: Kuibyshev and Saratov reservoirs/ edited by V.A. Znamenskiy, V.M. Geytenko. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1978. 269 p.

Сведения об авторах:

Селезнева Ксения Владимировна, канд. хим. наук, научный сотрудник, лаборатория мониторинга водных объектов, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, заместитель директора по научной и методической работе, Институт химии и энергетики Тольяттинского государственного университета, Россия, 445003, Самарская обл., г. Тольятти, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-9212-7708, e-mail: kvbepalova@yandex.ru

Селезнева Александра Васильевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория мониторинга водных объектов, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, Россия, 445003, Самарская обл., г. Тольятти, ORCID: 0000-0002-9386-999X, e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Селезнев Владимир Анатольевич, профессор, д-р техн. наук, канд. геогр. наук, заместитель директора по науке, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиала Самарского федерального исследовательского центра РАН, Россия, 445003, Самарская обл., г. Тольятти, ORCID: 0000-0002-0321-7614, e-mail: seleznev53@mail.ru

About the authors:

Ksenia V. Selezneva, Candidate of Chemical Sciences, Researcher at the Laboratory for Monitoring Water Bodies of the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Methodological Work of the Institute of Chemistry and Energy, Togliatti State University, Togliatti, Samara Oblast, 445003, Russia; ORCID: 0000-0002-9212-7708, e-mail: kvbepalova@yandex.ru

Aleksandra V. Selezneva, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory for Monitoring Water Bodies of the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Togliatti, Samara Oblast, 445003, Russia; ORCID: 0000-0002-9386-999X, e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Vladimir A. Seleznev, Professor, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Geographical Sciences, Deputy Director for Science of the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Togliatti, Samara Oblast, 445003, Russia; ORCID: 0000-0002-0321-7614, e-mail: seleznev53@mail.ru