

Содержание растворенного кислорода в воде Куйбышевского водохранилища в условиях массового развития водорослей

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

¹ Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Российская Федерация (445003, г. Тольятти, ул. Комзина, 10)

² Тольяттинский государственный университет, Российская Федерация (445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

Аннотация: Цель – дать количественную оценку и установить причины сезонной изменчивости содержания растворенного кислорода в условиях массового развития водорослей на Куйбышевском водохранилище.

Материалы и методы. В период 2001-2020 годы проводились систематические наблюдения на стационарном пункте в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища. Пространственная неоднородность степени насыщения поверхностного слоя воды кислородом оценивалась по данным периодических наблюдений с судна «Биолог», оборудованного информационно-измерительной системой качества воды «Хитон». Программа наблюдений разрабатывалась с учетом недельного и суточного режима регулирования водного стока в створе Жигулевского гидроузла.

Результаты и обсуждение. Установлено, что сезонная изменчивость состоит из четырех периодов, которые отличаются разнонаправленностью процессов формирования кислородного режима, и включает два минимума содержания растворенного кислорода. Зимний минимум наблюдался в марте в конце ледостава, а летний минимум – в августе во время массового развития водорослей. Одной из причин формирования летнего минимума кислорода является процесс массового развития сине-зеленых водорослей, благодаря которому образуется тонкий поверхностный слой воды, перенасыщенный кислородом. Данный слой воды сдерживает поступление кислорода из атмосферы в воду на значительной части акватории водохранилища. Летом аномально жаркого 2010 года перенасыщенная кислородом поверхность составляла более 30 % площади водохранилища, что способствовало снижению содержания кислорода в водной массе до критических концентраций.

Выводы. В условиях роста биогенной нагрузки и глобального потепления климата интенсивность и продолжительность процесса массового развития сине-зеленых водорослей на Куйбышевском водохранилище будет только усиливаться, что приведет к ухудшению качества воды и возникновению рисков водопользования.

Ключевые слова: водохранилище, растворенный кислород, сезонная изменчивость, пространственная неоднородность, дефицит кислорода, риски водопользования.

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

Для цитирования: Селезнева К. В., Селезнева А. В., Селезнев В. А. Содержание растворенного кислорода в воде Куйбышевского водохранилища в условиях массового развития водорослей // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2022, № 3, с. 97-108. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/3/97-108>

ВВЕДЕНИЕ

Куйбышевское водохранилище является самым крупным в Волжско-Камском каскаде [6] и используется в качестве источника хозяйственно-питьево-

го водоснабжения, а также для нужд рыбного хозяйства и рекреации. Его экологическое и санитарно-гигиеническое состояние во многом определяется содержанием в воде растворенного кислорода

© Селезнева К. В., Селезнева А. В., Селезнев В. А., 2022

✉ Селезнев Владимир Анатольевич, e-mail: seleznev53@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

в различные сезоны года. Особую озабоченность вызывает снижение концентрации кислорода ниже нормативных значений, что свидетельствует о загрязнении водохранилища и об изменении биологических процессов в водоеме.

Закономерности кислородного режима Куйбышевского водохранилища, в основном, изучены [1-5, 9-17, 21, 24-26]. Установлено, что после создания водохранилища в 1957 году кислородный режим претерпел серьезные изменения по сравнению с речными условиями, главное из которых, – установление вертикальной стратификации в содержании растворенного кислорода. В поверхностном слое воды содержание кислорода близко к насыщению, а в придонных слоях наблюдается его недостаток. Содержание кислорода в воде формируется в результате взаимодействия разнонаправленных процессов, одни из них уменьшают содержание кислорода, другие – увеличивают. Увеличение кислорода в воде осуществляется за счет его поступления из атмосферы и выделения водной растительностью в результате фотосинтеза. Уменьшение кислорода осуществляется за счет его потребления на окисление органических веществ и выделения кислорода из воды в атмосферу. Соотношение интенсивности указанных процессов определяет содержание растворенного кислорода в воде. Отмечено, что критические условия с минимальным содержанием кислорода наблюдаются в маловодные годы, а в сезонном разрезе – в период зимней межени (перед началом весеннего половодья) и в период летней межени (июль, август) из-за повышенного прогрева глубоких слоев воды.

Однако, недостаточно изучен процесс формирования кислородного режима в условиях массового развития водорослей, когда наблюдается летний дефицит кислорода и возникают риски использования водохранилища для питьевого водоснабжения и ведения рыбного хозяйства. В условиях роста биогенной нагрузки и глобального потепления климата актуальность изучения кислородного режима приобретает особое значение. Целью исследований является количественная оценка сезонной изменчивости концентрации растворенного кислорода в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища по многолетним данным, полученным на стационарном пункте наблюдений и по единой методике.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Куйбышевское водохранилище является самым крупным в Европе и расположено в центральной

части Волжского бассейна (рис. 1). Общая длина Куйбышевского водохранилища с учетом волжской и камской веток составляет 750 км, а его площадь при нормальном подпорном уровне – 6450 км². Максимальная ширина водохранилища – 40 км, максимальная глубина – 40,0 м. Морфология водохранилища сложная и характеризуется чередованием широких плесов и сужений, хорошо выраженными глубоководным руслом и мелководной поймой, а также наличием мелководных заливов в районах подпора боковых притоков. Самым крупным является Черемшанский залив [8].

Гидрохимические наблюдения проводились систематически в период 2001-2020 годы в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища и периодически по десяти створам на всей акватории (см. рис. 1). Стационарный пункт наблюдений расположен на левом берегу, в нижнем бьефе Жигулевского гидроузла. Ширина водохранилища в пункте наблюдения составляет 1,0 км, а глубина на вертикали отбора проб воды составляет 6-9 м. В данном пункте наблюдений происходит перемешивание водных масс Куйбышевского водохранилища, и практически по всей глубине водоема устанавливается однородная водная масса по физико-химическим показателям [23, 27].

Достоверная оценка сезонной изменчивости растворенного кислорода возможна только в случае, если она основана на однородном материале, собранном унифицировано по единой методике.

Пробы воды для гидрохимического анализа отбирались на стационарном пункте наблюдений ежемесячно в течение 20 лет. Дискретность отбора проб воды обоснована предварительными учащенными наблюдениями (4 раза в месяц). Для исключения влияния на содержание кислорода суточного и недельного режимов регулирования водного стока на Жигулевском гидроузле [20] пробы воды отбирались в определенный день недели (среда) и время суток (11 часов). Для количественной оценки сезонных изменений репрезентативные выборки для каждого месяца подвергались статистической обработке.

Растворенный кислород является весьма устойчивым компонентом химического состава вод. Поэтому при его определении особо тщательно осуществлялся отбор проб воды: исключался контакт воды с воздухом до фиксации кислорода. Наряду с определением абсолютных значений растворенного кислорода оценивалось относительное содержание кислорода в воде, выраженное в процентах его нормального содержания

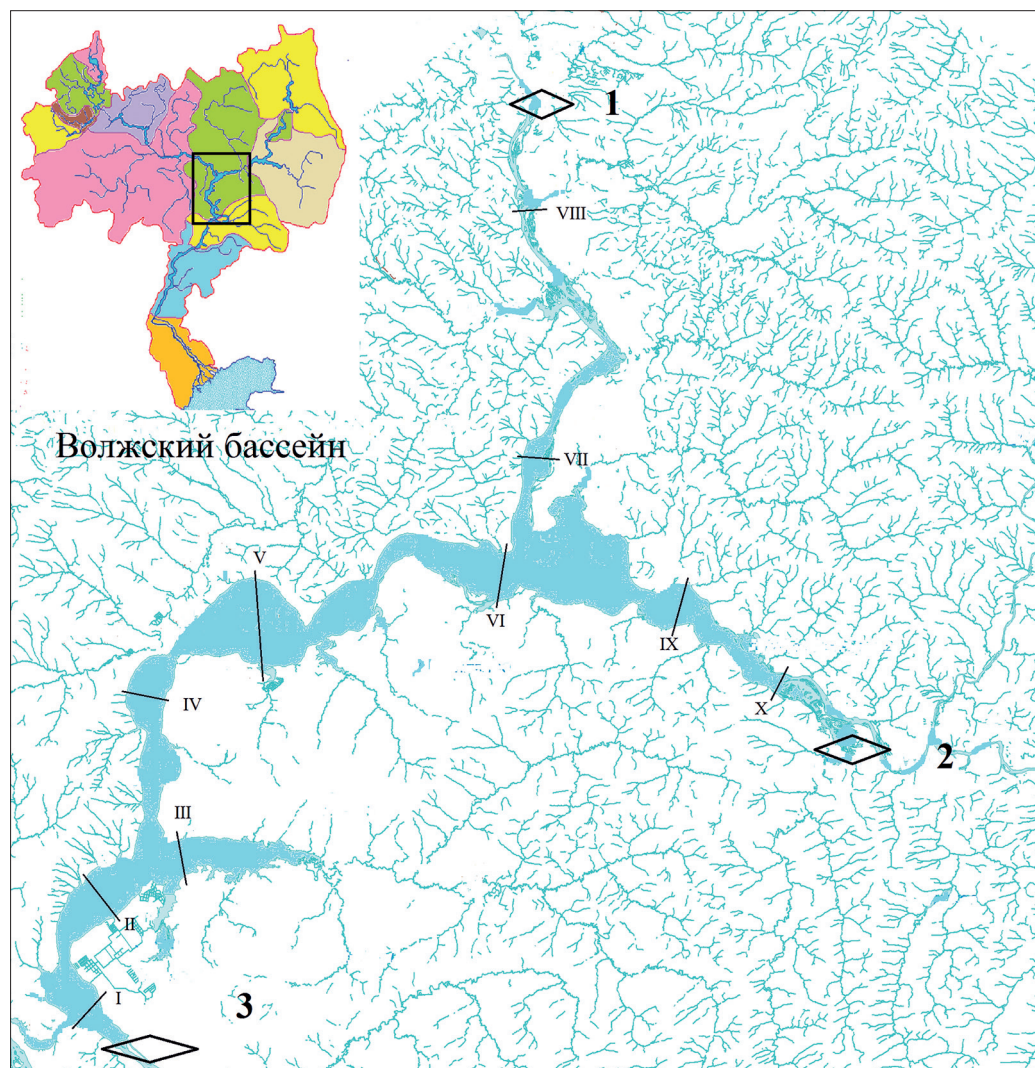


Рис. 1. Расположение створов на Куйбышевском водохранилище в Волжском бассейне (гидроузлы: 1–Чебоксарский, 2–Нижнекамский, 3–Жигулевский; I-X – створы наблюдений)
[Fig. 1. Location of gates on the Kuibyshev reservoir in the Volga basin (hydrosystems: 1 – Cheboksarsky, 2 – Nizhnekamsky, 3 – Zhigulevsky; I-X – observation lines)]

(степень насыщения кислородом). Для расчета степени насыщения определялись температура воды и атмосферное давление.

Отбор проб воды осуществлялся батометром Молчанова ГР-18, к крану которого прикреплена резиновая трубка длиной 25 см. При изъятии воды из батометра сводилась к минимуму возможность контакта пробы с атмосферой во избежание растворения кислорода из воздуха или улетучивания его из пробы в атмосферу. Не допускалось взбалтывание и перемешивание пробы воды. Отбор проб воды и определение массовой концентрации растворенного кислорода (DO) выполнялось в соответствии с руководящими документами Росгидромета (табл. 1).

Пространственные наблюдения на акватории водохранилища проводились периодически в

летний период по десяти створам (см. рис.1) на научно-исследовательском судне «Биолог». В качестве дополнительного средства измерения использовалась информационно-измерительная система качества воды «Хитон», с помощью которой определялись: температура и электропроводность воды, pH, растворенный кислород и хлорофилл «а». В период проведения экспедиционных работ осуществлялся контроль метеорологических и гидрологических параметров, включая температуру воздуха, скорость ветра, количество ясных дней, скорость течения, ветрового волнения и глубины водохранилища. Географические координаты научно-исследовательского судна, осуществляющего зондирование акватории водохранилища по десяти створам, определялись с помощью глобальной системы позиционирования (GPS).

Диапазон и точность измерения концентрации растворенного кислорода (DO)
 [Table 1. Dissolved oxygen (DO) measurement range and accuracy]

Период наблюдений / Period observations	Нормативный документ / Regulatory document	Диапазон измерений, мг/дм ³ / Measurement range, mg/dm ³	Показатель точности, ± Δ*, мг/дм ³ / Indicator Accuracy, ± Δ*, mg/dm ³	
			мг/дм ³ / mg/dm ³	% / %
2001-2005	ПНД Ф 14.1:2.100-97	4,0 < DO ≤ 10,0	-	30
		10,0 < DO ≤ 80,0	-	24
2006-2020	РД 52.24.419-2005	1,0 < DO ≤ 3,0	0,10 × DO	-
		3,0 < DO ≤ 15,0	0,032 × DO	-

Примечание: Δ* – границы абсолютной и относительной погрешности при вероятности P=0,95

[Note: Δ* – absolute and relative error limits at probability P=0.95]

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты наблюдений в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища показали, что средняя годовая концентрация растворенного кислорода за период 2001-2020 годы составила 9,5±0,3 мг/дм³. Средние годовые концентрации кислорода менялись незначительно: наибольшая концентрация составила 10,3±0,3 мг/дм³, а наименьшая – 9,0±0,3 мг/дм³. Внутригодовые концентрации растворенного кислорода менялись весьма существенно.

Средние месячные концентрации растворенного кислорода (DO), осредненные за период 2001-2020 годы, изменялись в пределах от 6,7±0,2 до 12,7±0,4 мг/дм³ (табл. 2). Наименьшие концентрации кислорода наблюдались в период летней межени (июль, август) и составили 6,7-7,1 мг/дм³.

В диапазоне многолетней изменчивости максимальные средние месячные концентрации растворенного кислорода (DO_{MAX}) изменялись от 8,2±0,3 (август) до 14,2±0,5 мг/дм³ (декабрь), а минимальные (DO_{MIN}) – от 4,8±0,2 мг/дм³ (август) до 11,7±0,4 мг/дм³ (январь). Амплитуда сезонных колебаний концентрации растворенного кислорода в основном увеличивалась за счет уменьшения концентрации кислорода в летний период.

Следовательно, за многолетний период наблюдений минимальные значения растворенного кислорода (DO_{MIN}) наблюдались в июле-августе и составили 4,8-5,0 мг/дм³ (табл. 2). Столь низкие значения растворенного кислорода не соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к водным объектам рыбохозяйственного назначения.

Таблица 2

Сезонные изменения концентрации кислорода: DO, DO_{MAX}, DO_{MIN}, мг/дм³
 [Table 2. Seasonal changes in oxygen concentration: DO, DO_{MAX}, DO_{MIN}, mg/dm³]

Кислород / Oxygen	Месяц / Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DO	12,3	10,9	9,1	8,6	9,6	8,3	7,1	6,7	7,8	9,2	11,1	12,7
DO _{MAX}	13,1	12,5	11,0	10,7	10,7	9,7	9,0	8,2	9,2	11,1	12,8	14,2
DO _{MIN}	11,7	9,6	7,6	7,0	7,9	6,8	5,0	4,8	6,4	6,7	9,7	11,6

Содержание растворенного кислорода характеризуется ярко выраженной сезонной изменчивостью (рис. 2), которая включает четыре периода: А, В, С и D. Сезонная изменчивость кислорода обусловлена взаимодействием разнонаправленных процессов, основными из которых являются: абсорбция или поступление кислорода в воду из атмосферы; поступление кислорода в результате фотосинтеза; потребление кислорода на биохимическое окисление органических и минеральных веществ; потребление кислорода на дыхание гидробионтов. В периоды А и С складывается отрица-

тельный, а для периодов В и D – положительный кислородный баланс.

Период (А) продолжается с января по апрель и характеризуется отрицательным кислородным балансом. В этот период наблюдается уменьшение концентрации кислорода с 12,3 до 8,6 мг/дм³ при неизменной температуре воды, близкой к нулю. Уменьшение кислорода в основном обусловлено прекращением поступления кислорода из атмосферы в условиях ледостава на водохранилище; постепенным заполнением водохранилища грунтовыми водами с низким содержанием кислорода.

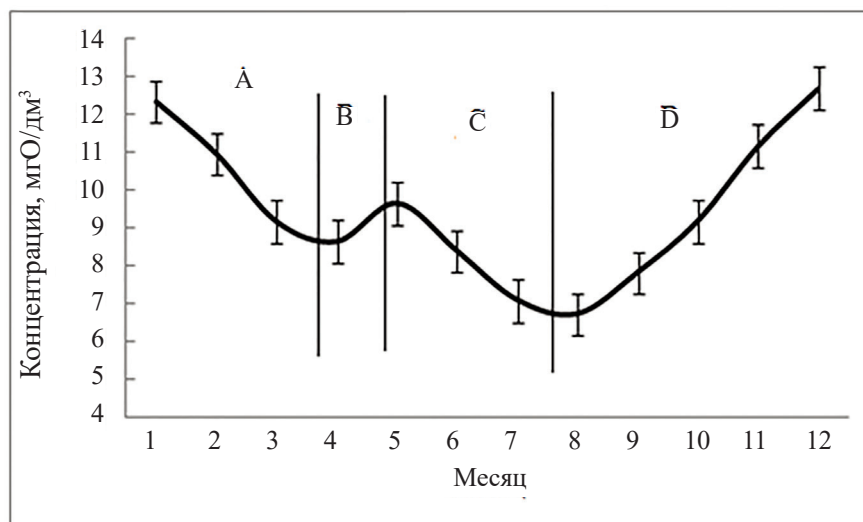


Рис. 2. Сезонная изменчивость концентрации растворенного кислорода (DO) (Т, ⊥ – вертикальные планки погрешностей)
 [Fig. 2. Seasonal variability of dissolved oxygen (DO) concentration (Т, ⊥ – vertical error bars)]

Период (B) продолжается с апреля по май, это самый короткий период сезонной изменчивости кислорода и характеризуется положительным кислородным балансом. В этот период наблюдается увеличение концентрации кислорода с 8,6 до 9,6 мг/дм³. Несмотря на рост температуры воды, наблюдается увеличение концентрации кислорода, в основном за счет заполнения водохранилища почвенно-поверхностными водами с высоким содержанием кислорода, поступления кислорода из атмосферы и в результате фотосинтеза водорослей.

Период (C) продолжается с мая по август и характеризуется отрицательным кислородным балансом. В этот период наблюдается уменьшение концентрации кислорода с 9,6 до 6,7 мг/дм³. Уменьшение содержания кислорода обусловлено повышением температуры воды, постепенным заполнением водохранилища грунтовыми водами с низким содержанием кислорода, потреблением кислорода на биохимическое окисление органических и минеральных веществ. Выделение кислорода в результате фотосинтеза водорослей не в состоянии остановить уменьшение кислорода. В конце этого периода наблюдаются самые низкие концентрации растворенного кислорода.

Период (D) продолжается с августа по декабрь и характеризуется положительным кислородным балансом. В этот период наблюдается увеличение концентрации кислорода с 6,7 до 12,7 мг/дм³. Увеличение содержания кислорода обусловлено понижением температуры воды, интенсификацией процесса поступления кислорода из атмосферы. В этот период процессы, обуславливающие по-

ступление кислорода, преобладают над процессами, ответственными за расходование кислорода в водных массах водохранилища.

В сезонной изменчивости кислорода отчетливо выделяются два минимума: зимний и летний (рис. 2), при этом летний минимум более существенный, чем зимний минимум. Зимний минимум кислорода наблюдался в марте в конце ледостава, а летний минимум – в июле-августе во время массового развития сине-зеленых водорослей. Концентрация растворенного кислорода в водных массах Куйбышевского водохранилища в летний минимум составляла менее 5,0 мг/дм³, что ниже допустимого уровня.

В жаркие и маловодные годы ухудшение кислородного режима становится наиболее очевидным. Например, в период летней межени 2010 года из-за аномальных погодных условий температура воздуха была существенно выше, а осадки ниже нормы. Этот год является экстремальным за весь период метеорологических наблюдений по продолжительности жарких и безветренных дней, что обусловлено длительным стоянием блокирующего антициклона летом в Поволжье.

Осредненная по глубине температура водных масс (t , °C) в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища превысила норму и составила в июле 23,5 °C, а в августе – 21,2 °C (табл. 3). Из-за маловодья на Средней и Нижней Волге и регулирования водного стока в экстремальных условиях в августе средний месячный расход воды сократился по сравнению с нормой в 3 раза и составил 2127 м³/с.

Сложившиеся на водохранилище гидрометеорологические условия летом 2010 года способствовали массовому развитию сине-зеленых водорослей, когда биомасса (по хлорофиллу «а») увеличилась в несколько раз. Концентрация растворенного кислорода (DO) существенно умень-

шилась и составила в июле 6,4 мг/дм³, в августе – 4,8 мг/дм³, а степень насыщения составила 75,6 % и 54,5 %, соответственно (табл. 3). Возникновению дефицита кислорода способствовали штительные условия, которые продолжительное время наблюдались на Куйбышевском водохранилище.

Таблица 3

Изменения температуры воды (t, °C), концентрации кислорода (DO, мг/дм³) и степени его насыщения (DO, %) [Table 3. Changes in water temperature (t, °C), oxygen concentration (DO, mg/dm³) and its degree of saturation (DO, %)]

Показатели / Indicators	Месяц / Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t, °C	0,1	0,1	0,1	1,2	10,2	20,4	23,5	21,2	18,4	8,4	4,2	0,2
DO, мг/дм ³	12,2	10,6	8,3	9,8	10,2	8,6	6,4	4,8	6,6	10,1	10,8	12,9
DO, %	83,6	72,6	57,1	69,2	91,1	96,0	75,8	54,5	70,5	86,3	82,4	88,4

В сезонном ходе концентрации кислорода в 2010 году наблюдались два минимума: один зимой в конце ледоставного периода (март), а другой летом в период массового развития водорослей (июль-август). При этом, летний минимум более значительный, чем зимний минимум по содержанию растворенного кислорода (рис. 3). Обращает на себя внимание тот факт, что максимум температуры воды, наблюдавшийся в июле, не совпадает с минимумом кислорода в августе.

Температура воды от июля к августу понизилась на 2,3 °C, что должно было привести к увели-

чению концентрации растворенного кислорода, а в действительности, наоборот, концентрация кислорода уменьшилась. Если учесть, что биохимическое потребление кислорода в июле и августе практически одинаковое, то возможно предположить, что существует дополнительный фактор, уменьшающий содержание кислорода в летний период. Вероятнее всего этим дополнительным фактором является процесс массового развития сине-зеленых водорослей, который оказывает негативное влияние на формирование летнего кислородного минимума.

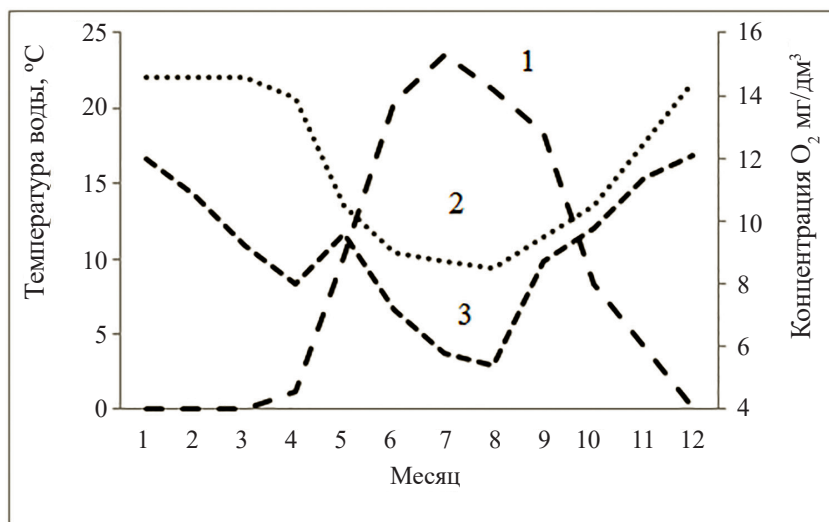


Рис. 3. Изменение температуры воды (1), концентрации равновесного (2) и фактического (3) кислорода в 2010 году

[Fig. 3. Changes in water temperature (1), equilibrium (2) and actual (3) oxygen concentrations in 2010]

Результаты многолетних пространственных наблюдений показали, что ежегодно в летний период на акватории Куйбышевского водохранилища наблюдался процесс массового развития сине-зеленых водорослей, который охватывал значительную часть акватории водохранилища (рис. 4).

Среди присутствующих водорослей в поверхностном слое воды определяющую роль играли сине-зеленые водоросли [7]. Отдельные представители сине-зеленых водорослей, присутствующие в водохранилище, способны продуцировать токсины [18]. Интенсивность и продолжительность про-



Рис. 4. Массовое развитие водорослей на акватории водохранилища
[Fig. 4. Massive development of algae in the water area of the reservoir]

цесса массового развития водорослей зависели от гидрометеорологических условий и режима регулирования водного стока на Жигулевском, Чебоксарском и Нижнекамском гидроузлах [21].

В период массового развития сине-зеленые водорослей существенным образом изменялись показатели качества воды. По мере увеличения биомассы водорослей (по хлорофиллу «а») концентрация биогенных веществ, в частности, нитратов и фосфатов в воде, уменьшалась, но увеличивалась цветность воды, появлялся неприятный запах, рН смещалась в сторону щелочной реакции, возрастало содержание взвешенных и растворенных органических веществ [22]. В целом, санитарно-гигиеническое состояние водохранилища, как источника питьевого водоснабжения, резко ухудшалось.

Учитывая, что Куйбышевское водохранилище используется для ведения рыбного хозяйства, особую тревогу вызывало нарушение кислородного режима, когда в поверхностном слое воды наблюдался переизбыток кислорода, а в придонном слое – его дефицит. Недостаток или переизбыток растворенного кислорода создавали крайне неблагоприятные условия для всех гидробионтов, включая ихтиофауну. В первом случае велика вероятность кислородного голодания (аноксия), а во втором – перенасыщение крови и тканей кислородом (газовая эмболия).

Детальное вертикальное зондирование водной массы водохранилища с использованием информационно-измерительной системы «Хитон» показало, что в местах скопления сине-зеленых водорослей наблюдалось перенасыщение воды кислородом. В результате фотосинтеза водорослей в тонком поверхностном слое (1-3 см) степень насыщения воды кислородом в русловой части водохранилища составляла 100-120 %, а в левобережной мелководной пойме и в заливах – 150-200 %.

Известно, что одним из главных источников поступления кислорода в поверхностные воды является его абсорбция из атмосферы (растворение кислорода при контакте с воздухом). Абсорбция происходит на поверхности водоема. Скорость этого процесса зависит от степени насыщения воды кислородом. Чем выше степень насыщения воды кислородом, тем меньше скорость абсорбции кислорода из атмосферы. При перенасыщении поверхностного слоя воды кислородом процесс абсорбции практически прекращается.

Экспедиционные исследования в летнюю межень 2010 года показали, что в солнечную и безветренную погоду на значительной части акватории Куйбышевского водохранилища образовался перенасыщенный кислородом поверхностный слой воды, который делает невозможным поступление

Таблица 4

Длина створа и доля створа с перенасыщенным содержанием кислорода
[Table 4. The length of the section and the proportion of the section with supersaturated oxygen content]

Параметры створа / Section parameters	Номер створа / Section number									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Длина створа, км / Section length, km	10,1	15,2	11,2	14,9	32,5	17,4	6,5	4,2	14,4	5,8
Доля створа, % / Section share, %	49,1	44,5	63,1	38,4	29,8	23,9	14,1	15,3	18,2	9,8

кислорода из атмосферы в воду. Наблюдение за процессом массового развития сине-зеленых водорослей и образованием перенасыщенного кислородом поверхностного слоя воды по акватории водохранилища осуществлялось по десяти створам (см. рис. 1). Длина створов зондирования на акватории водохранилища изменялась от 4,2 до 32,5 км (табл. 4).

Установлено, что перенасыщенный кислородом поверхностный слой воды характеризовался существенной пространственной неоднородностью как по длине, так и ширине водоема. Наиболее масштабно ею охвачена акватория средней и нижней частей водохранилища, особенно на мелководном левобережье и в заливах. Площадь покрытия водохранилища перенасыщенным кислородом поверхностным слоем воды в июне составила 5-7 %, а в июле существенно возросла до 20-32 %.

В период 19-26.07.2010 года доля створа, занятая перенасыщенным слоем, составила от 9,8 % (створ X) до 63,1 % (створ III) (см. табл. 4). Совершенно очевидно, что роль и значение перенасыщенного кислородом поверхностного слоя воды в формировании кислородного баланса Куйбышевского водохранилища зависит от продолжительности её существования, а также от её размеров на акватории водохранилища.

Проведенные исследования на Куйбышевском водохранилище показывают, что процесс массового развития сине-зеленых водорослей становится существенным негативным фактором формирования кислородного режима в период летней межени. Продолжительность и интенсивность процесса массового развития водорослей во многом зависят от таких гидрометеорологических параметров как температура воздуха, количество штилевых и солнечных дней. Поэтому в условиях глобального потепления климата проблема усиления процесса массового развития сине-зеленых водорослей и ухудшения качества воды водохранилища, включая кислородный режим, будет только обостряться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги исследования, можно сделать следующие выводы.

1. За многолетний период наблюдений (2001–2020 годы) средние годовые концентрации растворенного кислорода в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища менялись незначительно: средняя концентрация составила $9,5 \pm 0,3$ мг/дм³, наибольшая – $10,3 \pm 0,3$ мг/дм³, наименьшая – $9,0 \pm 0,3$ мг/дм³.

2. За 20 лет наблюдений размах средних месячных колебаний кислорода составил от $4,8 \pm 0,2$

до $14,2 \pm 0,5$ мг/дм³. Содержание растворенного кислорода характеризовалось ярко выраженной сезонной изменчивостью. Сезонная изменчивость включает четыре периода (А, В, С и D), которые отличаются разной направленностью процессов формирования кислородного режима в водной массе водохранилища. В периодах А и С концентрация растворенного кислорода увеличивается, а в периодах В и D – уменьшается.

3. Минимальные концентрации растворенного кислорода наблюдались в июле-августе во время массового развития сине-зеленых водорослей. В жаркие маловодные годы концентрация кислорода уменьшалась до критических значений и составила менее $5,0$ мг/дм³, что не соответствует нормативным требованиям.

4. Процесс массового развития сине-зеленых водорослей на Куйбышевском водохранилище становится существенным фактором формирования кислородного режима в период летней межени. При штилевых условиях на значительной части акватории водохранилища наблюдается перенасыщение кислородом тонкого поверхностного слоя воды, который сдерживает поступление кислорода из атмосферы в воду на значительной части акватории водохранилища.

5. В жаркие маловодные годы резко увеличивается негативное влияние массового развития сине-зеленых водорослей на формирование кислородного режима в водной массе Куйбышевского водохранилища. В условиях роста биогенной нагрузки и глобального потепления климата будут возникать риски использования водохранилища для рыбного хозяйства, питьевого водоснабжения и рекреации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алекин О.А. *Основы гидрохимии*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. 443 с.
2. Баранов И.В. Термический и гидрохимический режим Волги и Куйбышевского водохранилища в 1955-1957 гг. // *Труды Татарского отделения Всесоюзного научно-исследовательского озерного и речного рыбного хозяйства*, 1958, вып. 8, с. 32-68.
3. Бреховских В.Ф. *Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов*. Москва: Наука, 1988. 168 с.
4. Быковский В.И. Характеристики движения воды и размножение водорослей // *Гидробиологический журнал*, 1984, т. 20, № 4, с. 39-44.
5. Буторин Н.В. *Волга и ее жизнь*. Ленинград: Наука, 1978. 350 с.
6. Вуглинский В.С. *Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.

7. Герасимова Н. А. *Фитопланктон Саратовского и Волгоградского водохранилищ*. Тольятти, 1996. 200 с.
8. *Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища* / под ред. В. А. Знаменского, В. М. Гейтенко. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 269 с.
9. Гусева К. А. Цветение воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним // *Труды Всесоюзного гидробиологического общества*, 1952, т. 4, с. 3-92.
10. Гусева Н. Н. Газовый режим Куйбышевского водохранилища в подледный период 1957-1958 и 1958-1959 гг. // *Бюллетень Института биологии водохранилищ*, 1961, № 1, с. 53-56.
11. Даценко Ю. С. *Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты*. Москва: ГЕОС, 2007. 252 с.
12. Зенин А. А. *Гидрохимия Волги и её водохранилищ*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1965. 260 с.
13. Кременецкая Е. Р. Оценка скорости потребления кислорода в толще воды Можайского и Иваньковского водохранилищ // *Водные ресурсы*, 2007, т. 34, № 3, с. 310-317.
14. *Куйбышевское водохранилище* / отв. ред. А. В. Монаков. Ленинград: Наука, 1983. 214 с.
15. *Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник)* / отв. ред. Г. С. Розенберг, Л. А. Выхристюк. Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН, 2008. 123 с.
16. 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. DOI: <https://10.24411/0320-3557-2018-1-0005>
17. Литвинов А. С., Законнова А. В. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении // *Метеорология и гидрология*, 2012, № 9, с. 91-96.
18. Никитин О. В., Латыпова В. З., Степанова Н. Ю. Мониторинг цианобактериальных токсинов в водных объектах Республики Татарстан (2011-2016 гг.) // *Материалы международной научно-практической конференции «Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водных объектов: проблемы и пути решения»*, 2017, с. 51-62.
19. Петряхина Е. В., Селезнев В. А. Влияние недельного режима регулирования водного стока Волги на массовое развитие фитопланктона // *Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии*, 2016, т. 25, № 1, с. 170-175.
20. 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.
21. Селезнева А. В., Беспалова К. В., Селезнев В. А. Формирование качества воды волжских водохранилищ при аномальных погодных условиях // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 2013, № 5, с. 4-14.
22. Селезнева А. В., Беспалова К. В., Селезнев В. А. Оценка сезонной изменчивости качества воды в поверхностном источнике питьевого водоснабжения // *Градостроительство и архитектура*, 2018, т. 8, № 2 (31), с. 20-26.
23. Селезнев В. А., Селезнева А. В. Содержание хлоридных ионов в воде реки Волга // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География, Геоэкология*, 2021, № 4, с. 34-41. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2021.4/3748>
24. Сиренко Л. А., Гавриленко М. Я. *«Цветение» воды и эвтрофирование*. Киев: Наукова думка, 1978. 232 с.
25. Современная гидрохимическая характеристика реки Волга и ее водохранилищ / В. К. Дебольский, И. Л. Григорьева, А. Б. Комиссаров и др. // *Вода: химия и экология*, 2010, № 11, с. 2-12.
26. Эдельштейн К. К. *Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения*. Москва: ГЕОС, 1998. 277 с.
27. 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, v. 40, no. 5, pp. 307-311.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 25.02.2022

Принята к публикации 30.05.2022

The Content of Dissolved Oxygen in the Water of the Kuibyshev Reservoir Under Conditions of Mass Development of Algae

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

¹ Institute of Ecology of the Volga Basin RAS – branch of the Samara Federal Research Center RAS, Russian Federation (10, Komzina st., Tolyatti, Samara region, 445003)

² Togliatti State University, Russian Federation (14, Belorusskaya st., Tolyatti, Samara region, 445020)

Abstract: The aim is to quantify and establish the causes of seasonal variability in the content of dissolved oxygen in the conditions of mass development of algae in the Kuibyshev reservoir.

Materials and methods. In the period 2001-2020, systematic observations were carried out at a stationary point in the outlet section of the Kuibyshev reservoir. The spatial heterogeneity of the degree of saturation of the surface layer of water with oxygen was estimated according to the data of periodic observations from the vessel "Biolog" equipped with the information-measuring water quality system "Khiton". The observation program was developed taking into account the weekly and daily regime of regulation of the water line in the alignment of the Zhiguli hydroelectric complex.

Results and discussion. It has been established that the seasonal variability consists of four periods, which differ in the multidirectional formation of the oxygen regime, and includes two minima in the content of dissolved oxygen. The winter minimum was observed in March at the end of freeze-up, and the summer minimum was observed in August during the mass development of algae. One of the reasons for the formation of the summer oxygen minimum is the process of mass development of blue-green algae, due to which a thin surface layer of water supersaturated with oxygen is formed. This layer of water hinders the flow of oxygen from the atmosphere into the water in a significant part of the water area of the reservoir. In the abnormally hot summer of 2010, the surface oversaturated with oxygen accounted for more than 30 % of the reservoir area, which contributed to a decrease in the oxygen content in the water mass to critical concentrations.

Findings. Under the conditions of growing biogenic load and global climate warming, the intensity and duration of the process of mass development of blue-green algae in the Kuibyshev reservoir will only increase, which will lead to a deterioration in water quality and the emergence of water use risks.

Key words: reservoir, dissolved oxygen, seasonal variability, spatial heterogeneity, oxygen deficiency, water use risks.

Source of funding: The work was carried out under the state task (registration number 1021060107175-5-1.6.19).

For citation: Selezneva K. V., Selezneva A. V., Seleznev V.A. The Content of Dissolved Oxygen in the Water of the Kuibyshev Reservoir Under Conditions of Mass Development of Algae. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2022, no. 3, pp. 97-108. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/3/97-108>

REFERENCES

1. Alekin O.A., *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 444 p. (In Russ.)

2. Baranov I. V. Termicheskiy i gidrokhimicheskiy rezhim Volgi i Kuybyshevskogo vodokhranilishcha v 1955-1957 gg. [Thermal and hydrochemical regime of the Volga and Kuib-

yshev reservoir in 1955-1957]. *Trudy Tatarskogo otdeleniya Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo ozerogo i rechnogo rybnogo khozyaystva*, 1958, vol. 8, pp. 32-68. (In Russ.)

3. Brekhovskikh V.F. *Gidrofizicheskiye faktory formirovaniya kislorodnogo rezhima vodoyemov* [Hydro-physical factors of formation of the oxygen regime of reservoirs]. Moscow: Nauka, 1988. 168 p. (In Russ.)

© Selezneva K. V., Selezneva A. V., Seleznev V.A., 2022

✉ Vladimir A. Seleznev, e-mail: seleznev53@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

4. Bykovsky V.I. Kharakteristiki dvizheniya vody i razmnozheniye vodorosley [Characteristics of water movement and algae reproduction]. *Gidrobiologicheskii zhurnal*, 1984, v. 20, no. 4, pp. 39-44. (In Russ.)
5. Butorin N.V. *Volga i yeye zhizn'* [The Volga and its life]. Leningrad: Nauka, 1978. 350 p. (In Russ.)
6. Vuglinsky V.S. *Vodnyye resursy i vodnyy balans krupnykh vodokhranilishch SSSR* [Water resources and water balance of large reservoirs of the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 223 p. (In Russ.)
7. Gerasimova N.A. *Fitoplankton Saratovskogo i Volgogradskogo vodokhranilishch* [Phytoplankton of the Saratov and Volgograd reservoirs]. Tolyatti, 1996. 200 p. (In Russ.)
8. *Gidrometeorologicheskii rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR: Kuybyshevskoye i Saratovskoye vodokhranilishcha* [Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR: Kuibyshev and Saratov reservoirs] / pod red. V.A. Znamenskogo, V.M. Geytenko. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 269 p. (In Russ.)
9. Guseva K.A. Tsveteniye vody, yego prichiny, prognoz i mery bor'by s nim [Water bloom, its causes, forecast and measures to combat it]. *Trudy Vsesoyuznogo gidrobiologicheskogo obshchestva*, 1952, v. 4, pp. 3-92. (In Russ.)
10. Guseva N.N., Gazovyy rezhim Kuybyshevskogo vodokhranilishcha v podlednyy period 1957-1958 i 1958-1959 gg. [Gas regime of the Kuibyshev reservoir during the ice period 1957-1958 and 1958-1959.]. *Byulleten' Instituta biologii vodokhranilishch*, 1961, no. 1, pp. 53-56. (In Russ.)
11. Datsenko Yu. S. *Evtrofirovaniye vodokhranilishch: gidrologo-gidrokhimicheskiye aspekty* [Eutrophication of reservoirs: hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow: GEOS, 2007, 252 p. (In Russ.)
12. Zenin A.A. *Gidrokhiymiya Volgi i yeyo vodokhranilishch* [Hydrochemistry of the Volga and its reservoirs]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. 260 p. (In Russ.)
13. Kremenetskaya Ye.R. Otsenka skorosti potrebleniya kisloroda v tolshe vody Mozhayskogo i Ivan'kovskogo vodokhranilishch [Estimation of the rate of oxygen consumption in the water column of the Mozhaysk and Ivan'kovsky reservoirs]. *Vodnyye resursy*, 2007, v. 34, no. 3, pp. 310-317. (In Russ.)
14. *Kuybyshevskoye vodokhranilishche* [Kuibyshev reservoir] / pod red. A.V. Monakov. Leningrad: Nauka, 1983. 214 p. (In Russ.)
15. *Kuybyshevskoye vodokhranilishche (nauchno-informatsionnyy spravochnik)* [Kuibyshev reservoir (scientific and information guide)] / pod red. G.S. Rozenberg, L.A. Vykhristyuk. Tol'yatti: Institut ekologii Volzhskogo basseyna RAN, 2008. 123 p. (In Russ.)
16. Kislorodnyy rezhim vodokhranilishch Volgi i Kamy v period potepleniya klimata: posledstviya dlya zooplanktona zoobentos [Oxygen regime of the Volga and Kama reservoirs during climate warming: consequences for zooplankton zoobenthos] / V.I. Lazareva, I.E. Stepanova, A.I. Tsvetkov i dr. *Trudy IBVV RAN*, 2018, vol. 81(84), pp. 47-84. (In Russ.) DOI: [https:// 10.24411/0320-3557-2018-1-0005](https://10.24411/0320-3557-2018-1-0005)
17. Litvinov A.S. Termicheskiy rezhim Rybinskogo vodokhranilishcha pri global'nom poteplenii [Thermal regime of the Rybinsk reservoir under global warming]. *Meeteorologiya i gidrologiya*, 2012, no. 9, pp. 91-96. (In Russ.)
18. Nikitin O.V., Latypova V.Z., Stepanova N.Yu. Monitoring tsianobakterial'nykh toksinov v vodnykh ob'yektakh Respubliki Tatarstan (2011-2016 gg.) [Monitoring of cyanobacterial toxins in water bodies of the Republic of Tatarstan (2011-2016)]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Global'noye rasprostraneniye protsessov antropogennogo evtrofirovaniya vodnykh ob'yektov: problemy i puti resheniya»*, 2017, pp. 51-62. (In Russ.)
19. Petryakhina Ye.V., Seleznev V.A. Vliyaniye nedel'nogo rezhima regulirovaniya vodnogo stoka Volgi na massovoye razvitiye fitoplanktona [Influence of the weekly regime of regulation of the Volga water flow on the mass development of phytoplankton]. *Samarskaya Luka: problema regional'noy i global'noy ekologii*, 2016, v. 25, no. 1, pp. 170-175. (In Russ.)
20. Selezneva A.V., Seleznev V.A., Bespalova K.V., Massovoye razvitiye vodorosley na vodokhranilishchakh r. Volgi v usloviyakh malovod'ya [The mass development of algae in the reservoirs of the river]. *Povolzhskiy ekologicheskii zhurnal*, 2014, no. 1, pp. 88-96. (In Russ.)
21. Selezneva A.V., Bespalova K.V., Seleznev V.A., Formirovaniye kachestva vody volzhskikh vodokhranilishch pri anomal'nykh pogodnykh usloviyakh [Formation of water quality in the Volga reservoirs under abnormal weather conditions]. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*, 2013, no. 5, pp. 4-14. (In Russ.)
22. Selezneva A.V., Bespalova K.V., Seleznev V.A. Otsenka sezonnoy izmenchivosti kachestva vody v povorkhnostnom istochnike pit'yevogo vodosnabzheniya [Assessment of seasonal variability of water quality in a surface source of drinking water supply]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, v. 8, no. 2(31), pp. 20-26. (In Russ.)
23. Seleznev V.A., Selezneva A.V. Soderzhaniye khloridnykh ionov v vode reki Volga [The content of chloride ions in the water of the Volga River]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya, Geokologiya*, 2021, no 4, pp. 34-41. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2021.4/3748>
24. Sirenko L.A. Gavrilenko M. Ya. «Tsveteniye» vody i evtrofirovaniye ["Flowering" of water and eutrophication]. Kiev: Naukova Dumka, 1978. 232 p. (In Russ.)
25. Sovremennaya gidrokhimicheskaya kharakteristika reki Volga i yeye vodokhranilishch [Modern hydrochemical characteristics of the Volga River and its reservoirs] / V.K. Debol'skiy, I.L. Grigor'eva, A.B. Komissarov i dr. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2010, no.11, pp. 2-12. (In Russ.)
26. Edelshtein K.K. *Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskkiye problemy, puti ikh resheniya* [Reservoirs of Russia: environmental problems, ways to solve them]. Moscow: GEOS, 1998. 277 p. (In Russ.)
27. 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, v. 40, no. 5, pp. 307-311. DOI:10.3103/s1063455X18050107.

Ксения Владимировна Селезнева

кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов Самарского федерального исследовательского центра РАН Института экологии Волжского бассейна Российской академии наук, заместитель директора по научной и методической работе Института химии и энергетики Тольяттинского государственного университета, Самарская обл., г. Тольятти, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-9212-7708, e-mail: kvbespalova@yandex.ru

Селезнева Александра Васильевна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов Самарского федерального исследовательского центра РАН Института экологии Волжского бассейна Российской академии наук, Самарская обл., г. Тольятти, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-9386-999X, e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Селезнев Владимир Анатольевич

профессор, доктор технических наук, кандидат географических наук, главный научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов Самарского федерального исследовательского центра РАН Института экологии Волжского бассейна Российской академии наук, Самарская обл., г. Тольятти, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-0321-7614, e-mail: seleznev53@mail.ru

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 25.02.2022

Accepted: 30.05.2022

Ksenia V. Selezneva

Cand. (Chemic.) Sci., Researcher at the Laboratory for Monitoring Water Bodies of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences, Samara Region, Togliatti, Russian Federation, Deputy Director for Scientific and Methodological Work of the Institute of Chemistry and Energy, Togliatti State University, ORCID: 0000-0002-9212-7708, e-mail: kvbespalova@yandex.ru

Alexandra V. Selezneva

Cand. (Tech.) Sci., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory for Monitoring Water Bodies of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences, Samara Region, Togliatti, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-9386-999X, e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Vladimir A. Seleznev

Professor, Dr. (Tech.) Sci., Cand. (Tech.) Sci., Chief Researcher of the Laboratory for Monitoring Water Bodies of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences, Samara Region, Togliatti, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-0321-7614, e-mail: seleznev53@mail.ru