



УДК 574.5(282.247.461.1)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.126>

Особенности сезонной изменчивости интегральных показателей содержания растворенных органических веществ в условиях массового развития цианобактерий в Куйбышевском водохранилище

В. А. Селезнев*

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

Аннотация. Исследуются особенности сезонной изменчивости содержания растворенных органических веществ под воздействием процесса массового развития цианобактерий в Куйбышевском водохранилище. Использованы данные мониторинга на приплотинном плесе водохранилища в период 2017–2022 гг. Отбор проб воды осуществлялся ежемесячно с поверхностного горизонта 0,5 м. Установлено среднее годовое содержание растворенных органических веществ по следующим показателям: биохимическое потребление кислорода ($1,6 \text{ мгО/дм}^3$), перманганатная окисляемость ($7,5 \text{ мгО/дм}^3$) и химическое потребление кислорода (25 мгО/дм^3). Летом 2021 г. дополнительно определялись: структура, численность и биомасса фитопланктона. Указано, что сезонная изменчивость включает четыре периода, которые отличаются направлениями изменений содержания растворенных органических веществ. Определен вклад процесса массового развития цианобактерий в формирование сезонной изменчивости содержания растворенных органических веществ. Делается вывод, что проблема органического загрязнения Куйбышевского водохранилища будет только обостряться в условиях активизации процесса массового развития цианобактерий из-за глобального потепления климата.

Ключевые слова: органические вещества, сезонная изменчивость, цианобактерии, водохранилище.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-27-10008.

Для цитирования: Селезнев В. А. Особенности сезонной изменчивости интегральных показателей содержания растворенных органических веществ в условиях массового развития цианобактерий в Куйбышевском водохранилище // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 50. С. 126–140. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.126>

Features of Seasonal Variability of Integral Indicators of the Content of Dissolved Organic Substances under Conditions of Mass Development of Cyanobacteria in the Kuibyshev Reservoir

V. A. Seleznev*

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

Abstract. The study is aimed at determining the features of seasonal variability of the content of dissolved organic matter under the influence of the process of mass development of cyanobacteria in the Kuibyshev Reservoir. For this purpose, monitoring data from the Pridaminny reach of the reservoir in the period 2017-2022 were used. Water samples were taken monthly from the surface horizon (0.5 m) for the following indicators: chlorophyll a (Chl); biochemical oxygen demand (BOD₅); permanganate oxidizability (PO) and chemical oxygen demand (COD). In the summer of 2021, the following were additionally determined: structure, abundance and biomass of phytoplankton. It was found that the average annual content of dissolved organic matter is: 1.6 mgO/dm³ for BOD₅; 7.5 mgO/dm³ for PO and 25 mgO/dm³ for COD. Seasonal variability includes four periods, which differ in the directions of changes in the dissolved organic matter content. In the future, the problem of organic pollution of the Kuibyshev Reservoir will only worsen in the context of the intensification of the MRC process due to global warming.

Keywords: organic matter, seasonal variability, cyanobacteria, reservoir.

For citation: Seleznev V.A. Features of Seasonal Variability of Integral Indicators of the Content of Dissolved Organic Substances under Conditions of Mass Development of Cyanobacteria in the Kuibyshev Reservoir. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 50, pp. 126-140. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.126> (in Russian)

Введение

По ряду интегральных показателей качество воды водохранилищ Средней и Нижней Волги не соответствует нормативным требованиям¹, предъявляемым к водным объектам хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного назначения, так как превышает предельно допустимую концентрацию систематически по химическому потреблению кислорода, перманганатной окисляемости и периодически по биохимическому потреблению кислорода. Учитывая высокую антропогенную нагрузку на водохранилища и активизацию процесса массового развития цианобактерий (МРЦ) в условиях глобального потепления климата, есть основания предполагать, что проблема качества воды на водохранилищах будет только обостряться.

Органическое вещество (ОВ) играет важную роль в функционировании водных экосистем. От содержания растворенных органических веществ (РОВ) зависит качество воды, уровень трофии водоемов и их продукционные возможности [Role of lakes ... , 2003]. Состав и концентрация РОВ в поверх-

¹ СанПин 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания; Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552.

ностных водах определяются совокупностью многих, часто различных по своей природе и скорости процессов [Ефремова, Зобкова, 2019]. По своему происхождению органические вещества в водоемах подразделяют на две группы: аллохтонные и автохтонные [Аллохтонное и автохтонное ... , 2007; Pokrovsky, 2017]. Автохтонные представлены легко окисляемыми [Sources and controls ... , 2016; Factors governing biodegradability ... , 2021], а аллохтонные [Ackman, Zinke, Hingley, 1974; Hedges, 1992; Liu, 2020] – трудно окисляемыми продуктами [Органическое вещество и ... , 2015].

Образование в водохранилище автохтонного органического вещества обусловлено сложнейшими процессами создания первичного органического вещества и его разложения [Бульон, 2004; Baines, Pace, 1991; Даценко, 2007; Persistence of dissolved ... , 2015]. Существенный вклад привносит процесс МРЦ – многофакторное и динамичное природное явление, активное изучение которого началось с 60-х гг. прошлого века и продолжается по настоящее время [Сиренко, Гавриленко, 1978; Содержание хлорофилла и ... , 2022; Уманская, Горбунов, Тарасова, 2023].

Процесс МРЦ зависит от термических условий [Селезнева, Селезнев, 2024]. Увеличение температуры воды из-за потепления климата в условиях высокого содержания биогенных веществ и замедленного водного обмена активизирует процесс МРЦ, для которого перечисленные абиотические факторы являются крайне благоприятными. При усилении процесса МРЦ и увеличении биомассы цианобактерий будет увеличиваться экспорт метаболитов, что повлечет за собой дальнейший рост содержания РОВ в водной массе водохранилищ [Селезнева, Селезнева, Селезнев, 2022; Моисеенкова, Динуа, 2023].

Одним из важнейших показателей глобального потепления климата является тенденция на повышение температуры воздуха [IPCC, 2022: Climate ... ; 2022]. По данным Росгидромета, за последние 100 лет на территории России температура воздуха повысилась на 1,0 °С. Начиная с 1970-х гг. каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего. В последние годы повышение температуры воздуха происходит наиболее интенсивно. Согласно данным Всемирной метеорологической организации, 2021 г. стал седьмым годом подряд, когда глобальная температура воздуха была выше доиндустриального уровня (1850–1900 гг.) более чем на 1 °С.

На Средней Волге за последние 60 лет наблюдается рост температуры воды [Литвинов, Законнова, 2012]. Особый интерес вызывает современный период (2015–2022 гг.), когда летняя температура воздуха и воды увеличилась на 2–4 °С по сравнению с нормой, сдвинулись границы зоны температурного оптимума для цианобактерий. Процесс МРЦ теперь начинается раньше, а заканчивается позже [Селезнева, Селезнева, Селезнев, 2023].

Глобальное потепление и связанные с ним гидрологические изменения [Литвинов, Законнова, 2012] существенно влияют на многие физико-химические и биологические процессы. Повышение температуры воды усиливает продукционные процессы, размножение и метаболизм цианобактерий [Paerl, Paul, 2012], что приводит к дополнительному образованию органических веществ автохтонной природы [Моисеенкова, Динуа, 2023]. Следова-

тельно, потепление климата приведет к изменениям в соотношениях аллохтонного и автохтонного органического вещества в водных системах в пользу последних.

Оценкой общей концентрации органического вещества в воде водохранилищ Волги занимаются с момента их создания. При этом получены результаты, характеризующие в основном пространственную неоднородность интегральных показателей РОВ по акватории водохранилищ в разные гидрологические сезоны года: весеннее половодье, летняя и осенняя межень. Однако недостаточно внимания уделялось детальным исследованиям особенностей сезонной изменчивости содержания органических веществ в водохранилищах под воздействием глобального потепления климата.

Фрагментарные наблюдения на водохранилищах показывают, что содержание РОВ увеличивается во время процесса МРЦ. Поэтому основная цель исследования – оценить особенности сезонной изменчивости содержания РОВ в воде водохранилищ на основе данных натурных наблюдений в одной точке и на единой методической основе, определить вклад процесса МРЦ в содержание РОВ в современных условиях глобального потепления климата. В качестве объекта исследований выбрано Куйбышевское водохранилище, для которого процесс МРЦ является характерным, а его продолжительность и интенсивность во многом определяются погодными условиями.

Объект и методы исследования

Куйбышевское водохранилище является самым крупным в Европе по площади. Оно расположено в центральной части Волжского бассейна и характеризуется сезонным, недельным и суточным режимами регулирования водного стока. Общая длина 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 – 50 м при нормальном подпорном уровне воды. Морфология водохранилища сложная и характеризуется чередованием расширений и узостей, глубоководными и мелководными участками, наличием заливов, образованных от подпора боковых притоков водохранилища.

В период летней межени складываются благоприятные условия для развития процесса МРЦ, по акватории водохранилища характеризующегося значительной пространственной неоднородностью. Наиболее интенсивно протекает на мелководье и в заливах, где стоковое течение практически отсутствует. При антициклоническом типе погоды в июле и августе биомасса цианобактерий в поверхностном горизонте может достигать более 100 мг/дм³ и оказывать влияние на формирование органических веществ [Seleznev, Bepalova, Selezneva, 2018].

Органические вещества природных вод характеризуются различной степенью дисперсности, могут находиться в состоянии истинных растворов, коллоидов и взвешенных грубых частиц (суспензий). Коллоидная форма миграции (высокомолекулярная) наиболее характерна для природных вод, богатых крупноразмерными гумусовыми веществами. Все органические гуму-

совые вещества и их комплексы с ионами железа обуславливают цветность вод. Часть органического вещества представлена в виде взвесей, например, детрита, состоящего из мельчайших органических и неорганических остатков, образующихся при распаде погибших организмов [Hansell, Carlson, Suzuki, 2002; Kim, Kaplan, Hatcher, 2006; Reactivity continuum of ... , 2012]. В данном исследовании внимание уделяется растворенной форме органических веществ.

Для изучения сезонной изменчивости содержания РОВ и ее особенностей в условиях процесса МРЦ использованы данные, полученные в период 2017–2022 гг. в замыкающем створе приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища. Здесь процесс МРЦ наблюдается ежегодно при достижении температуры воды 22 °С и более. Наблюдения проводились ежемесячно в течение шести лет. Пробы воды отбирались в 100 м от левого берега в створе с. Ягодного с глубины 0,5 м батометром Молчанова ГР-18. Химический анализ проб воды осуществлялся по следующим показателям: хлорофилл *a* X_L , биохимическое потребление кислорода BPK_5 , перманганатная окисляемость $ПО$ и химическое потребление кислорода XPK в соответствии с действующими методиками определения (табл. 1). Дополнительно в летний период наиболее жаркого 2021 г. отбирались пробы воды для изучения состава фитопланктона, оценки численности и биомассы отдельных групп водорослей. Пробы воды для анализа фитопланктона были собраны одновременно с пробами воды для определения содержания X_L . Биомасса фитопланктона вычислена счетно-объемным методом. Параллельно осуществлялся контроль температуры воды, растворенного кислорода и рН.

Таблица 1

Методики, диапазон и точность измерения X_L , BPK_5 , $ПО$ и XPK

Показатель	Диапазон измерения, размерность	Методика определения	Точность измерения*
X_L	0,1–150,0 мкг/дм ³	РД 52.24.784-2013	1,0–29,0
BPK_5	0,5–5,0 мгО/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97	±26 %
$ПО$	2,0–100 мгО/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.154-99	±10 %
XPK	10–100 мгО/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.210-2005	±25 %

Примечание: * – границы погрешности при вероятности $p = 0,95$.

Определение BPK_5 , $ПО$, XPK и X_L в лабораторных условиях осуществлялось по действующим методикам (см. табл. 1) с указанием диапазона и точности измерений. При массовом развитии цианобактерий наиболее показателен в оценке обилия фитопланктона «чистый» хлорофилл *a* [Содержание хлорофилла ... , 2022]. Контроль X_L необходим для определения границ начала и окончания, продолжительности интенсивности процесса МРЦ.

Традиционно показатели $ПО$ и XPK используются для количественной оценки РОВ и выражаются в мгО/дм³ атомарного кислорода. Их величина измеряется количеством кислорода, расходуемого на окисление РОВ в одном литре воды. Величина $ПО$ характеризует в первую очередь содержание биохимически стойких аллохтонных гумусовых веществ и примерно 30–50 % окисления органического вещества. XPK – это показатель, дающий бо-

лее полное представление о содержании РОВ, так как при его определении окисляется $\approx 90\%$ органических веществ. По величине ХПК принято судить о суммарном содержании РОВ [Скопинцев, 1950]. Величина БПК₅ служит количественной оценкой лабильных, т. е. наименее консервативных биохимически нестойких органических веществ. В первую очередь это касается автотонных ОВ планктонного происхождения.

Полученные результаты химического анализа группировались по месяцам в отдельные выборки: X_L , БПК₅, ПО и ХПК, которые подвергались статистической обработке с использованием программы Statistica v 6.0. Оценивались средние, максимальные и минимальные значения показателей в выборке, а также значения среднего квадратичного отклонения (стандарт).

Результаты и обсуждение

По данным многолетних наблюдений, в 2017–2022 гг. в межгодовом аспекте содержание X_L изменялось весьма существенно и зависело от термических условий: чем теплее лето, тем больше X_L . Наибольшее содержание наблюдалось в теплый 2021 г., когда средняя температура воды за летний период (июнь – август) составила 23,1 °С, а среднее содержание X_L – 7,4 мкг/дм³, максимальная среднемесячная температура наблюдалась в июле и составила 24,3 °С, а максимальное содержание X_L – 22,6 мкг/дм³. Наименьшее содержание наблюдалось в холодный 2017 г., когда средняя температура воды за летний период (июнь – август) составила 19,2 °С, а среднее содержание X_L – 0,7 мкг/дм³, максимальная среднемесячная температура наблюдалась в августе и составила 22,6 °С, а максимальное содержание X_L – 1,9 мкг/дм³.

Сезонная динамика содержания X_L характеризуется хорошо выраженной сезонной изменчивостью (табл. 2). С июня по июль включительно наблюдалось увеличение среднего содержания X_L в 3,5 раза, а затем с начала августа наблюдалось уменьшение содержания X_L в 2,4 раза. В июле и августе на Куйбышевском водохранилище доминируют цианобактерии, их биомасса составляет 70–90 % от общей биомассы фитопланктона. Поэтому в июле и августе содержание X_L в основном характеризует биомассу цианобактерий.

Таблица 2

Содержание X_L и показателей БПК₅, ПО, ХПК в воде приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища в период 2017–2022 гг.

Значение	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
X_L , мкг/дм ³												
Среднее	н/о	н/о	0,1	0,3	1,1	3,1	10,9	4,6	2,1	0,6	0,3	н/о
Максимальное	н/о	н/о	0,2	0,8	1,4	6,9	21,6	7,2	3,2	0,8	0,5	н/о
Минимальное	н/о	н/о	н/о	0,6	0,5	0,7	0,7	0,8	0,6	0,4	н/о	н/о
$БПК_5$, мгО/дм ³												
Среднее	1,0	1,1	1,2	1,7	1,9	1,5	2,3	2,3	1,8	1,6	1,5	1,1
Максимальное	1,6	1,7	1,7	1,9	2,0	1,7	2,6	2,5	2,1	1,7	1,6	1,2
Минимальное	0,8	0,9	1,0	1,5	1,6	1,3	2,0	2,0	1,7	1,5	1,4	1,0

Окончание табл. 2

Значение	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Стандарт	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,6	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3
<i>ПО, мгО/дм³</i>												
Среднее	7,0	7,1	7,2	7,4	7,8	7,5	8,5	8,6	7,4	7,1	7,0	7,0
Максимальное	7,8	8,1	8,6	9,4	10,3	9,8	12,1	11,5	9,4	8,1	7,8	7,5
Минимальное	6,5	6,2	6,3	6,8	6,5	7,1	7,4	7,9	6,2	6,3	6,2	6,1
Стандарт	1,5	1,6	1,4	1,3	1,4	1,2	1,6	1,2	1,0	1,0	0,9	0,8
<i>ХПК, мгО/дм³</i>												
Среднее	23	24	25	25	26	25	27	27	26	26	25	25
Максимальное	27	28	30	31	27	31	36	33	30	31	28	27
Минимальное	20	21	21	19	18	21	20	22	21	20	19	16
Стандарт	7	6	5	6	6	5	5	5	4	5	4	3

Примечание: н/о – не обнаружено данным методом.

Принято считать, что содержание X_L отражает биомассу фитопланктона. На примере 2021 г. проведен анализ летнего фитопланктона (табл. 3). Его биомассу в основном формируют цианобактерии (сине-зеленые водоросли): в июне – 4,25 мг/дм³ (86 %); июле – 6,82 мг/дм³ (99 %), августе – 5,16 мг/дм³ (84 %). Поэтому летом динамика содержания X_L в основном характеризует процесс МРЦ. В период активизации процесса МРЦ предполагается увеличение содержания легкоокисляемых растворенных органических веществ за счет экспорта метаболитов цианобактерий в водную массу.

Таблица 3

Средняя биомасса фитопланктона на приплотинном плесе
Куйбышевского водохранилища в 2021 г. (мг/дм³)

Группа водорослей	Июнь	Июль	Август
Сине-зеленые/цианобактерии	4,25	6,82	5,16
Диатомовые	0,47	0,03	0,63
Криптофитовые	0,02	0	0,02
Динофитовые	0,06	0	0,08
Зеленые	0,13	0,01	0,19
Прочие	0	0	0
Сумма	4,93	6,86	6,08

Процесс МРЦ [Сухаревич, Поляк, 2020], или цианобактериальное «цветение» воды [Уманская, Горбунов, Тарасова, 2023], на Куйбышевском водохранилище наблюдается практически ежегодно в период летней межени. По результатам многолетних наблюдений установлено, что в этот период в структуре фитопланктона доминирует группа Цианобактерии (сине-зеленые водоросли) в присутствии групп Диатомовые и Зеленые [Горохова, 2016].

Наиболее наглядно процесс МРЦ проявляется в жаркие и маловодные годы при установлении антициклонического типа погоды. При достижении температуры воды 22 °С в ясную солнечную погоду и отсутствии ветра происходит лавинообразное размножение цианобактерий, резко увеличивается их биомасса и, как следствие, резко возрастает содержание X_L [Селезнева,

Селезнев, 2024]. Есть основание предполагать, что именно в этот период фитопланктоном выделяется значительное количество РОВ.

За период 2017–2022 гг. среднее значение показателя BPK_5 составило $1,6 \text{ мгО/дм}^3$. С июня по июль наблюдалось увеличение среднего значения BPK_5 на $0,8 \text{ мг/дм}^3$, в июле и августе этот показатель практически не изменялся, а в сентябре снизился на $0,5 \text{ мгО/дм}^3$. В межгодовом аспекте максимальное значение наблюдалось в июле и августе жаркого 2021 г. и составило $2,3\text{--}2,5 \text{ мгО/дм}^3$, а минимальное наблюдалось в холодном 2017 г. и в июле и августе снизилось до $2,0 \text{ мгО/дм}^3$. В сезонном аспекте наибольшие значения BPK_5 наблюдались летом (июль – август) и совпадали по времени с наступлением наибольших значений X_L .

Динамика показателя BPK_5 характеризуется хорошо выраженной сезонной изменчивостью. Средние значения постепенно увеличиваются от зимы к лету, а затем уменьшаются от лета к зиме. Подобные изменения согласуются с классическим представлением о том, что сезонный ход BPK_5 в основном зависит от изменения температуры и от исходной концентрации растворенного кислорода. Исключение составляет непродолжительный период во время пропуска весеннего половодья через створ Жигулевского гидроузла, когда показатель BPK_5 несколько снижается.

Особый интерес вызывает летний период (июль – август), когда показатель BPK_5 продолжает увеличиваться и достигает наибольших величин (рис. 1). Рост содержания BPK_5 совпадает с увеличением содержания X_L и биомассой фитопланктона, которую в июле и августе в основном формируют цианобактерии. Определение продолжительности и границ периода высоких значений X_L позволяет на графике сезонной изменчивости BPK_5 выделить зону (красный цвет) (рис. 1), образованную процессом МРЦ. В среднем вклад процесса МРЦ в увеличение показателя BPK_5 составляет для летнего периода (июль – август) 20–25%.

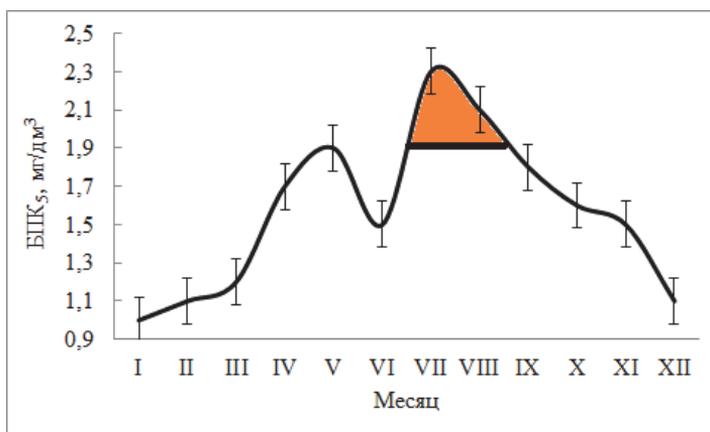


Рис. 1. Вклад процесса МРЦ (красный цвет) в формирование сезонной изменчивости BPK_5 по данным наблюдений в 2017–2022 гг. (Т, ⊥ – планки погрешностей)

В июле и августе показатель $БПК_5$ в воде Куйбышевского водохранилища, как правило, превышает гигиенический норматив качества ($2,0 \text{ мгО/дм}^3$) и требования к обеспечению безопасности для человека² и предельно допустимую концентрацию ($2,1 \text{ мгО/дм}^3$), установленную для водных объектов рыбохозяйственного назначения³.

За период 2017–2022 гг. среднее значение показателя $ПО$ составило $7,5 \text{ мгО/дм}^3$. С июня по июль наблюдалось увеличение на $1,0 \text{ мгО/дм}^3$. В течение июля и августа показатель $ПО$ менялся незначительно, оставаясь на высоком уровне $8,5\text{--}8,6 \text{ мгО/дм}^3$. В сентябре зафиксировано снижение на $1,2 \text{ мгО/дм}^3$ (рис. 2). В межгодовом разрезе максимальное значение показателя $ПО$ наблюдалось в июле и августе жаркого 2021 г. и составило $11,5\text{--}12,1 \text{ мгО/дм}^3$, а минимальное значение – холодным 2017 г. и в июле и августе снизилось до $7,4\text{--}7,9 \text{ мгО/дм}^3$. В сезонном разрезе наибольшие значения $ПО$ наблюдались летом (июль – август) и совпадали по времени с наступлением наибольших значений X_L .

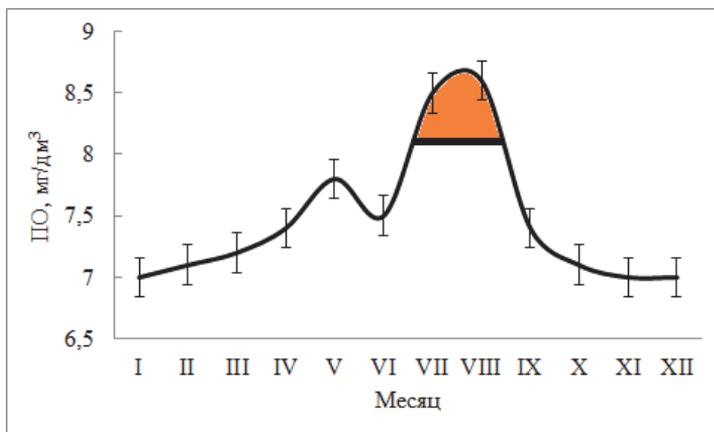


Рис. 2. Вклад процесса МРЦ (красный цвет) в формирование сезонной изменчивости $ПО$ по данным наблюдений в 2017–2022 гг. (T, ± – планки погрешностей)

Сезонная динамика показателя $ПО$ характеризуется сначала его ростом от зимы к лету с $7,0$ до $8,6 \text{ мгО/дм}^3$, а затем постепенным уменьшением от лета к зиме с $8,6$ до $7,0 \text{ мгО/дм}^3$. Исключение составляет непродолжительный период во время пропуска весеннего половодья через створ Жигулевского гидроузла, когда значения $ПО$ несколько снижаются с $7,8$ до $7,5 \text{ мгО/дм}^3$. В сезонном аспекте наибольшие значения $ПО$ приходятся на июль – август в период высокого содержания X_L . За счет процесса МРЦ $ПО$ увеличивается на $13\text{--}15 \%$.

² СанПиН 1.2.3685-21

³ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552.

Среднее значение показателя *XПК* за период 2017–2022 гг. составило 25 мгО/дм³. С июня по июль наблюдалось увеличение на 2,0 мгО/дм³. В течение июля и августа показатель не менялся, в сентябре уменьшился на 1,0 мгО/дм³ (рис. 3). В межгодовом разрезе максимальное значение показателя *XПК* наблюдалось в июле и августе жаркого 2021 г. и составило 36 и 33 мгО/дм³, соответственно. Минимальное значение наблюдалось холодным летом 2017 г. и в июле и августе снизилось до 20 и 22 мгО/дм³, соответственно.

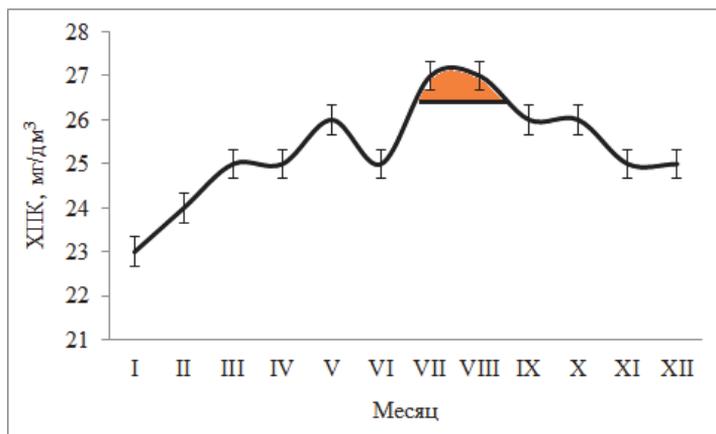


Рис. 3. Вклад процесса МРЦ (красный цвет) в формирование сезонной изменчивости *XПК* по данным наблюдений в 2017–2022 гг. (Т, ⊥ – планки погрешностей)

Сезонная динамика показателя *XПК* характеризуется сначала постепенным ростом от зимы к лету, когда содержание увеличивается до 27 мгО/дм³, а затем постепенным уменьшением от лета к зиме до 24 мгО/дм³. Наибольшие значения *XПК* наблюдались летом (июль – август) и совпадали по времени с наступлением наибольших значений $X_{\text{л}}$. За счет процесса МРЦ *XПК* увеличилось на 4–6 % (см. рис. 3).

В течение всего года показатель *XПК* в воде Куйбышевского водохранилища существенно превышает допустимый норматив (15 мгО/дм³) по СанПиН 1.2.3685-21.

Результаты исследований показывают, что содержание РОВ в воде Куйбышевского водохранилища в период 2017–2022 гг. по интегральным показателям (*БПК*₅, *ПО* и *XПК*) характеризуется сезонной изменчивостью, которая включает четыре периода (I, II, III и IV), отличающиеся друг от друга продолжительностью и разнонаправленными изменениями содержания РОВ.

Период I характеризуется постепенным увеличением содержания РОВ с января по май. Является самым продолжительным и длится 6 месяцев (с декабря по май). Это период зимней межени до начала пропуска стока весеннего половодья через створ Жигулевской ГЭС, во время которого наблюдается увеличение интегральных показателей: *БПК*₅ – с 1,0 до 1,9 мгО/дм³; *ПО* – с 7,0 до 7,8 мгО/дм³; *XПК* – с 23 до 26 мгО/дм³.

Период II характеризуется уменьшением содержания РОВ. Является самым коротким и длится около одного месяца (с середины мая до середины июня), когда проходит весеннее половодье. В этот период наблюдается уменьшение интегральных показателей: $БПК_5$ – с 1,9 до 1,5 мгО/дм³; $ПО$ – с 7,8 до 7,5 мгО/дм³; $ХПК$ – с 26 до 25 мгО/дм³.

Период III характеризуется увеличением содержания РОВ. Продолжительность составляет 2 месяца (с июля по август). Это период действия процесса МРЦ и наибольшего содержания РОВ, в течение которого наблюдается увеличение интегральных показателей: $БПК_5$ – с 1,5 до 2,3 мгО/дм³; $ПО$ – с 7,5 до 8,6 мгО/дм³; $ХПК$ – с 25 до 27 мгО/дм³.

Период IV характеризуется постепенным уменьшением содержания РОВ и продолжается 3 месяца (с сентября по ноябрь). Это период летне-осенней межени, во время которого наблюдается уменьшение интегральных показателей: $БПК_5$ – с 2,3 до 1,1 мгО/дм³; $ПО$ – с 8,6 до 7,0 мгО/дм³; $ХПК$ – с 27 до 25 мгО/дм³.

Среди перечисленных обоснованную озабоченность вызывает период III, при котором содержание РОВ достигает наибольших величин и не соответствует нормативным требованиям по трем интегральным показателям: $БПК_5$, $ПО$ и $ХПК$. В этот период увеличение содержания РОВ в основном обуславливается процессом, протекающим внутри водоема, главный – это процесс массового развития цианобактерий.

Выводы

Результаты исследований на приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища в период 2017–2022 гг. показывают, что содержание РОВ характеризуется хорошо выраженной сезонной изменчивостью интегральных показателей ($БПК_5$, $ПО$ и $ХПК$) и включает четыре периода (I, II, III и IV), которые отличаются друг от друга продолжительностью и разнонаправленными изменениями содержания РОВ. Амплитуда внутригодовых колебаний $БПК_5$, $ПО$ и $ХПК$ зависит от содержания $X_{л}$.

Особенность сезонной изменчивости обусловлена тем, что в периоде III наблюдается увеличение $БПК_5$ на 20–25 %, $ПО$ – на 13–15 %, $ХПК$ – на 4–6 % за счет процесса МРЦ. Степень увеличения показателей зависит от интенсивности и продолжительности процесса МРЦ, который, в свою очередь, зависит от температуры воды и типа погодных условий. С ростом температуры воды и активизации процесса МРЦ содержание РОВ будет увеличиваться.

В настоящее время качество воды Куйбышевского водохранилища уже не соответствует нормативным требованиям систематически по $ХПК$ и $ПО$ и периодически – по $БПК_5$. В условиях глобального потепления климата и активизации процесса МРЦ проблема увеличения содержания РОВ в воде Куйбышевского водохранилища будет только обостряться, возникнут дополнительные риски для хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного использования водохранилища.

Список литературы

- Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии / П. А. Лозовик, А. К. Морозов, М. Б. Зобков [и др.] // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237.
- Бульон В. В. Вклад основных групп автотрофных организмов в первичную продукцию водоемов // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 1. С. 92–102.
- Горохова О. Г. Состав и структура сообществ фитопланктона Усинского залива Куйбышевского водохранилища в период «цветения» воды // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 5. С. 122–130.
- Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-геохимические аспекты. М. : ГЕОС, 2007. 252 с.
- Ефремова Т. А., Зобкова М. В. Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в воде Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 9. С. 60–75.
- Литвинов А. С., Законнова А. В. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 91–96.
- Моисеенкова Т. И., Динуа М. И. Биогеохимия природных органических веществ в водах суши: распределение и изменчивость при потеплении климата // Геохимия. 2023. Т. 68, № 2. С. 187–196.
- Органическое вещество и его компоненты в поверхностных водах гумидной зоны / М. В. Зобкова, Т. А. Ефремова, П. А. Лозовик, А. В. Сабылина // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 115–120.
- Селезнева А. В., Селезнев В. А. Влияние погодных условий на процесс массового развития цианобактерий в Куйбышевском водохранилище // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 47. С. 57–76. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.57>
- 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.
- Селезнева К. В., Селезнева А. В., Селезнев В. А. Трансформация термического режима Куйбышевского водохранилища на фоне глобального потепления климата // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2023. № 3. С. 57–67.
- Сиренко Л. А., Гавриленко М. Я. «Цветение» воды и эвтрофирование. Киев : Наукова Думка, 1978. 230 с.
- Скопичев Б. А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус). Л. : Гидрометеиздат, 1950. 290 с.
- Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ Волги (2019–2020 гг.) / Н. М. Минеева, И. В. Семадени, В. В. Соловьева, О. С. Макарова // Биология внутренних вод. 2022. № 4. С. 367–371. <https://doi.org/10.31857/S0320965222040210>
- Сухаревич В. И., Поляк Ю. М. Глобальное распространение цианобактерий: причины и последствия (обзор) // Биология внутренних вод. 2020. № 6. С. 562–572.
- Уманская М. В., Горбунов М. Ю., Тарасова Н. Г. Цианобактериальные цветения воды в пресноводных континентальных водоемах: обзор // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 5. С. 182–194.
- Ackman R. G., Zinke B. A., Hingley J. Some details of the fatty acids and alcohols in the lipids of North Atlantic copepods // J. Fish. Res. Board Canada. 1974. Vol. 31. P. 1818–1821.
- Baines S. B., Pace M. L. The production of dissolved organic matter by phytoplankton and importance to bacteria: Patterns across marine and freshwater systems // Limnol. Oceanogr. 1991. Vol. 36, N 6. P. 1078–1090.
- Factors governing biodegradability of dissolved natural organic matter in Lake / C. Crapart, T. Andersen, D. O. Hessen, N. Valiente // Water. 2021. Vol. 13. P. 2210.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change / ed. by H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor [et al.]. Cambridge ; N. Y. : Cambridge University Press, 2022. 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Liu F. Dissolved organic carbon concentration and biodegradability across the global rivers // A meta-analysis Sci. of The Tot. Env. 2020. Vol. 818. P.151828

Hansell D. A., Carlson C. A., Suzuki Y. Dissolved organic carbon export with North Pacific Intermediate Water formation // Glob. Biogeochem. Cycle. 2002. Vol. 16. P. 1007.

Hedges J. J. Global biogeochemical cycles: progress and problems // Mar. Chem. 1992. Vol. 39. P. 67–93.

Kim S., Kaplan L. A., Hatcher P. G. Biodegradable dissolved organic matter in a temperate and a tropical stream determined from ultra-high resolution mass spec-trometry // Limnol. Oceanogr. 2006. Vol. 51. P. 1054–1063.

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

Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics / A. M. Kellerman, D. N. Kothawala, T. Dittmar, L. J. Tranvik // Nature Geoscience. 2015. Vol. 8. P. 454–457.

Pokrovsky O. S. Allochthonous and autochthonous carbon in deep, organic-rich and organic-poor lakes of the European Russian subarctic // Boreal Environment research. 2017. Vol. 22. P. 213–230.

Reactivity continuum of dissolved organic carbon decomposition in lake water / B. Koehler, E. von Wachenfeldt, D. Kothawala, L. J. Tranvik // J. Geophys. Res. 2012. P. 117.

Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone / G. Algesten, S. Sobek, A.-K. Bergstro [et al.] // Global Change Biol. 2003. Vol. 10. P. 141–147.

Seleznev V. A., Bessalova K. V., Selezneva A. V. Seasonal variability of phosphate content in the Volga water under conditions of anthropogenic eutrophication of reservoirs // Journal of Water Chemistry and Technology. 2018. Vol. 40, Iss. 5. P. 307–311. <https://doi.org/10.3103/S1063455X18050107>.

Sources and controls of organic carbon in lakes across the subarctic treeline / M. Rantala, L. Nevalainen, M. Rautio, A. Galkin // Biogeochem. 2016. Vol. 129. P. 235–253.

References

Lozovik P.A., Morozov A.K., Zobkov M.B., Dukhovichev T.A., Osipova L.A. Allochthonous and autochthonous organic matter in surface waters of Karelia. *Vodnyye resursy* [Water resources], 2007, vol. 34, no. 2, pp. 225-237. (in Russian)

Bul'on V.V. Vklad osnovnykh grupp avtotrofnnykh organizmov v pervichnyuyu produktsiyu vodoyemov [Contribution of the main groups of autotrophic organisms to the primary production of water bodies]. *Vodnyye resursy* [Water resources], 2004, vol. 31, no. 1, pp. 92-102. (in Russian)

Gorokhova O.G. Sostav i struktura soobshchestva fitoplanktona Usinskogo zaliva Kuybyshevskogo vodokhranilishcha v period "tsveteniya" vod [Composition and structure of phytoplankton communities in the Usinsk Bay of the Kuibyshev Reservoir during the period of water bloom]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 18, no. 5, pp. 122-130. (in Russian)

Datsenko YU.S. *Evtrofirovaniye vodokhranilishch. Gidrologo-geokhimicheskiye aspekty* [Eutrophication of reservoirs. Hydrological and geochemical aspects]. Moscow, GEOS Publ., 2007, 252 p. (in Russian)

Yefremova T.A., Zobkova M.V. Soderzhaniye, raspredeleniye i sootnosheniye osnovnykh komponentov organicheskogo veshchestva v vode Onezhskogo ozera [Content, distribution and ratio of the main components of organic matter in the water of Lake Onega]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2019, no. 9, pp. 60-75. (in Russian)

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

Moiseyenkova T.I., Dinua M.I. Biogekhimiya prirodnykh organicheskikh veshchestv v vodakh sushi: raspredeleniye i izmenchivost' pri potepnenii klimata [Biogeochemistry of natural organic

matter in terrestrial waters: distribution and variability under climate warming]. *Geokhimiya* [Geochemistry], 2023, т. 68, no. 2, pp. 187-196. (in Russian)

Zobkova M.V., Yefremova T.A., Lozovik P.A., Sabylina A.V. Organicheskoye veshchestvo i yego komponenty v poverkhnostnykh vodakh gumidnoy zony [Organic matter and its components in surface waters of the humid zone]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances of modern natural science], 2015, no.12, pp. 115-120. (in Russian)

Selezneva A.V., Seleznev V.A. Vliyaniye pogodnykh usloviy na protsess massovogo razvitiya tsianobakteriy v Kuybyshevskom vodokhranilishche [Influence of weather conditions on the process of mass development of cyanobacteria in the Kuibyshev reservoir]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series], 2024, vol. 47, pp. 57-76. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.57> (in Russian)

Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Soderzhaniye rastvorennoogo kisloroda v vode Kuybyshevskogo vodokhranilishcha v usloviyakh massovogo razvitiya vodorosley [The content of dissolved oxygen in the water of the Kuibyshev reservoir under conditions of massive algae development]. *Vestnik VGU, Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [VSU Bulletin, Series: Geography. Geoecology], 2022, no. 3, pp. 97-108. (in Russian)

Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Transformatsiya termicheskogo rezhima Kuybyshevskogo vodokhranilishcha na fone global'nogo potepeniya klimata [Transformation of the thermal regime of the Kuibyshev reservoir against the backdrop of global warming]. *Vestnik VGU, Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [VSU Bulletin, Series: Geography. Geoecology], 2023, no. 3, pp. 57-67. (in Russian)

Sirenko L.A., Gavrilenko M.YA. "Tsvetniye" vody i evtrofirovaniye ["Blooming" of water and eutrophication]. Kiev, Nauka dumka Publ., 1978, 230 p. (in Russian)

Skopintsev B.A. *Organicheskoye veshchestvo v prirodnykh vodakh (vodnyy gumus)* [Organic matter in natural waters (aqueous humus)]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1950, 290 p. (in Russian)

Mineyeva N. M., Semadeni I.V., Solov'yeva V.V., Makarova O.S. Soderzhaniye khlorofilla i sovremennoye troficheskoye sostoyaniye vodokhranilishch Volgi (2019–2020 gg.) [Chlorophyll content and current trophic state of Volga reservoirs (2019–2020)]. *Biologiya vnutr. vod.* [Biology of inland waters], 2022, no. 4, pp. 367-371. <https://doi.org/10.31857/S0320965222040210> (in Russian)

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

Umanskaya M.V., Gorbunov M.Yu., Tarasova N.G. Tsianobakterialnyye tsveteniya vody v presnovodnykh kontinental'nykh vodoyemakh: obzor [Cyanobacterial blooms in freshwater continental reservoirs: a review]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2023, vol. 25, no. 5, pp. 182-194. (in Russian)

Ackman R.G., Zinke B.A., Hingley J. Some details of the fatty acids and alcohols in the lipids of North Atlantic copepods. *J. Fish. Res. Board Canada*, 1974, vol. 31, pp. 1818-1821.

Baines S.B., Pace M.L. The production of dissolved organic matter by phytoplankton and importance to bacteria: Patterns across marine and freshwater systems. *Limnol. Oceanogr.*, 1991, vol. 36, no. 6, pp. 1078-1090.

Crapart C, Andersen T., Hessen D. O., Valiente N. Factors governing biodegradability of dissolved natural organic matter in Lake. *Water*, 2021, no.13, 2210 p.

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed by H.-O. Pörtner et al. Cambridge and New York, Cambridge University Press, 2022, 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Liu F. Dissolved organic carbon concentration and biodegradability across the global rivers. *A meta-analysis Sci. of The Tot. Env.*, 2020, pp. 151828.

Hansell D.A., Carlson C.A., Suzuki Y. Dissolved organic carbon export with North Pacific Intermediate Water formation. *Glob. Biogeochem. Cycle*, 2002, no. 16, 1007 pp.

Hedges J.J. Global biogeochemical cycles: progress and problems. *Mar. Chem.*, 1992, vol. 39, pp. 67-93.

Kim S., Kaplan L.A., Hatcher P.G. Biodegradable dissolved organic matter in a temperate and a tropical stream determined from ultra-high resolution mass spec-trometry. *Limnol. Oceanogr.*, 2006, no. 51, pp. 1054-1063.

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

Kellerman A.M., Kothawala D.N., Dittmar T., Tranvik L.J. Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics. *Nature Geoscienc.*, 2015, no. 8, pp. 454-457.

Pokrovsky O.S. Allochthonous and autochthonous carbon in deep, organic-rich and organic-poor lakes of the European Russian subarctic. *Boreal Environment research*, 2017, no. 22, pp. 213-230.

Koehler B., von Wachenfeldt E., Kothawala D., Tranvik L.J. Reactivity continuum of dissolved organic carbon decomposition in lake water. *Geophys. Res.*, 2012, p. 117.

Algesten G., Sobek S., Bergstro A.-K. et al. Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone, *Global Change Biol.*, 2003, no. 10, pp. 141-147.

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

Rantala M., Nevalainen L., Rautio M., Galkin A. Sources and controls of organic carbon in lakes across the subarctic treeline. *Biogeochem*, 2016, vol. 129, pp. 235-253.

Сведения об авторе

Селезнев Владимир Анатольевич
доктор технических наук, кандидат
географических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе
Институт экологии Волжского бассейна
РАН – филиал Самарского Федерального
исследовательского центра РАН
Россия, 445003, г. Тольятти, ул. Комзина, 10
e-mail: seleznev53@mail.ru.

Information about the author

Seleznev Vladimir Anatolyevich
Doctor of Sciences (Technics), Candidate of
Sciences (Geography), Professor, Deputy
Director of Research
Institute of Ecology of the Volga Basin RAS – a
Branch of the Samara Federal Research Center
RAS
10, Komzin st., Togliatti, 445003,
Russian Federation
e-mail: seleznev53@mail.ru

Код научной специальности: 1.6.21

Статья поступила в редакцию 04.05.2024; одобрена после рецензирования 07.12.2024; принята к публикации 12.12.2024
The article was submitted May, 04, 2024; approved after reviewing December, 07, 2024; accepted for publication December, 12, 2024