

УДК 574.52

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОЦЕССА МАССОВОГО РАЗВИТИЯ ЦИАНОБАКТЕРИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ РАСТВОРЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ВОДЕ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2024 А.В. Селезнева

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

Статья поступила в редакцию 08.07.2024

Исследование направлено на определение трансформации сезонной изменчивости содержания растворенных органических веществ (РОВ) под воздействием процесса массового развития цианобактерий (МРЦ) в Куйбышевском водохранилище. Для этой цели использованы данные мониторинга на Приплотинном плесе водохранилища в период 2017-2022 гг. Отбор проб воды осуществлялся ежемесячно с поверхностного горизонта (0,5 м) по следующим показателям: хлорофилл «а» (Хл «а»); биохимическое потребление кислорода (БПК₅); перманганатная окисляемость (ПО) и химическое потребление кислорода (ХПК). Летом 2021 г. дополнительно определялись: структура, численность и биомасса фитопланктона. Установлено, что среднее годовое содержание РОВ составляет: 1,6 мгО/дм³ по БПК₅; 7,5 мгО/дм³ по ПО и 25 мгО/дм³ по ХПК. Сезонная изменчивость включает четыре периода, которые отличаются разнонаправленными трендами. В первый период содержание РОВ увеличивается с декабря по май и захватывает зимнюю межень до начала весеннего половодья. Второй период характеризуется уменьшением содержания РОВ и наблюдается во время весеннего половодья. Третий период характеризуется увеличением содержания РОВ из-за процесса МРЦ и продолжается 2 месяца во время летней межени. В этот период наблюдается наибольшее содержание РОВ из-за процесса МРЦ. Четвертый период характеризуется уменьшением содержания РОВ и продолжается с сентября по декабрь. Процесс МРЦ, контролируемый по содержанию Хл «а», трансформирует сезонную изменчивость содержания РОВ. Летом (июль-август) наблюдается увеличение содержания РОВ под воздействием процесса МРЦ на 20-25 % по БПК₅, на 13-15 % по ПО и на 4-6 % по ХПК. В перспективе проблема органического загрязнения Куйбышевского водохранилища будет только обостряться в условиях активизации процесса МРЦ из-за глобального потепления климата. Ключевые слова: растворенные органические вещества, сезонная изменчивость, трансформация, фитопланктон, влияние цианобактерий, Куйбышевское водохранилище.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-5-142-154

EDN: ХКСРВО

*Работа выполнена в рамках государственного задания
(номер 1021060107175-5-1.6.19).*

ВВЕДЕНИЕ

Среди широкого спектра контролируемых показателей качества воды в водохранилищах Средней и Нижней Волги наибольшую озабоченность вызывает содержание растворенных органических веществ (РОВ). Качество воды водохранилищ не соответствует нормативным требованиям (СанПиН 1.2.3685-21; *Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552*), предъявляемым к водным объектам хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного назначения, систематически по химическому потреблению кислорода (ХПК) и перманганатной окисляемости (ПО) и периодически по биохимическому потреблению кислорода (БПК₅) [16]. Вследствие

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

высокой антропогенной нагрузки на водохранилища [2, 25] и современного глобального потепления климата [41] есть основания предполагать, что проблема качества воды будет только обостряться.

Увеличение температуры воды водохранилищ Волги [19] и высокое содержание биогенных веществ [3] активизируют процесс массового развития цианобактерий (МРЦ), для которого перечисленные абиотические факторы являются крайне благоприятными. При увеличении биомассы цианобактерий будет увеличиваться экспорт метаболитов, что повлечет за собой дальнейшее увеличение содержания РОВ в водной массе водохранилищ [24, 29].

Процесс МРЦ на водохранилищах – это многофакторный и динамичный процесс, активное изучение которого началось с 60-х годов прошлого века и продолжается по настоящее время [11, 17, 23, 27, 28, 31; 35]. Активизации процесса МРЦ

способствуют следующие условия: температура воды более 22 °С и высокая надводная освещенность; биогенная нагрузка, прежде всего, по азоту и фосфору; слабое турбулентное перемешивание водных масс и антициклонический тип погоды. В природе цианобактерии играют роль продуцента и насыщают водную массу растворенным кислородом и органическими веществами.

Органическое вещество (ОВ) играет важную роль в функционировании водных экосистем. От содержания ОВ зависит качество воды, уровень трофии водоемов и их продукционные возможности [38, 26]. Состав и концентрация ОВ в поверхностных водах определяются совокупностью многих, часто различных по своей природе и скорости процессов [7, 13].

По своему происхождению органические вещества в водоемах подразделяют на две группы: аллохтонное и автохтонное [20, 21, 48]. Автохтонное органическое вещество представлено легко окисляемыми, а аллохтонное - трудно окисляемыми продуктами [15, 18]. Аллохтонное органическое вещество обусловлено поступлением органического веществ в водоемы вследствие вымывания из почв, торфяников и лесных подстилок водосбора атмосферными осадками. На количество и состав аллохтонного органического вещества огромное влияние оказывает антропогенный фактор в виде промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, диффузных стоков с урбанизированных территорий или сельскохозяйственных угодий. Значительную часть органического вещества природных вод составляют гумусовые вещества [40, 49].

Автохтонное ОВ образуется внутри водоема вследствие продуктов биохимического распада остатков организмов, населяющих водоем (главным образом, планктон), а также прижизненных выделений метаболитов живыми организмами. Эта группа ОВ включает липиды, белки, фенолы, азотсодержащие соединения, углеводы [42]. Образование в водохранилище автохтонного ОВ обусловлено сложнейшими процессами создания первичного органического вещества и его разложения [4, 5, 6, 8, 12, 14; 39, 44].

Чрезмерное поступление в водохранилища Волги биогенных веществ активизирует процесс МРЦ. Только от точечных источников (сброс сточных вод) ежегодно в бассейн Волги сбрасывается значительное количество биогенных веществ: нитратов ($\approx 130 \times 10^3$ т), общего фосфора ($\approx 13 \times 10^3$ т). К сожалению, количественные показатели диффузного загрязнения отсутствуют. Однако экспертные оценки показывают, что поступление азота и фосфора от диффузных источников загрязнения соизмеримо с их поступлением от точечных источников [50].

Глобальное потепление и связанные с ним гидрологические изменения (Литвинов и др.,

2012) существенно влияют на многие физико-химические и биологические процессы, в том числе, на метаболизм и размножение цианобактерий. При потеплении климата активизируются продукционные процессы, что приводит к дополнительному образованию органических веществ автохтонной природы [24]. Потепление может способствовать росту цианобактерий, поскольку при увеличении температуры воды скорость роста возрастает [47]. Следовательно, можно предположить, что потепление климата приведет к изменениям в соотношениях аллохтонного и автохтонного органического вещества в водных системах в пользу последних.

Один из важнейших показателей глобального потепления климата является тренд на повышение температура приземного слоя атмосферы. По данным Росгидромета за последние 100 лет общее повышение температуры воздуха для территории России составило 1,0 °С. Начиная с 70-х годов прошлого века, каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего. В последние годы повышение температуры воздуха происходит наиболее интенсивно. Согласно данным Всемирной метеорологической организации 2021 год стал седьмым годом подряд, когда глобальная температура воздуха была выше до индустриального уровня (1850-1900 гг.) более, чем на 1 °С.

На Средней Волге за последние 60 лет наблюдается увеличение температуры воды [19]. Особый интерес вызывает современный период (2015-2022 гг.), когда летняя температура воздуха и воды увеличилась на 2-4 °С по сравнению нормой, сдвинулись границы зоны температурного оптимума для цианобактерий. Процесс МРЦ теперь начинается раньше, а заканчивается позже [30].

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 сезонной изменчивости содержания РОВ в водохранилищах по данным многолетних наблюдений в одной точке и на единой методической основе.

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, определить вклад процесса МРЦ в содержание РОВ в современных услови-

ях глобального потепления климата. В качестве объекта исследований выбрано Куйбышевское водохранилище, для которого процесс МРЦ является характерным, а его продолжительность и интенсивность во многом определяется погодными условиями.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Куйбышевское водохранилище является самым крупным в Европе. Оно расположено в центральной части Волжского бассейна и характеризуется сезонным, недельным и суточным режимом регулирования водного стока [9]. 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.

На водохранилище в период летней межени складываются благоприятные условия для развития процесса МРЦ. По акватории водохранилища процесс МРЦ характеризуется значительной пространственной неоднородностью. Наиболее интенсивно процесс 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.

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 гумусовые 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 [43, 45, 46]. В данном исследовании внимание уделяется растворенной форме органических веществ.

Для изучения сезонной изменчивости содержания РОВ и её трансформации под воздействием процесса МРЦ использованы данные, полученные в период 2017-2022 гг. на При-

плотинном плесе Куйбышевского водохранилища. В этом районе водохранилища процесс МРЦ наблюдается ежегодно при достижении температуры воды 22 °С и более. Наблюдения проводились ежемесячно в течение 6 лет. Пробы воды отбирались в 100 м от левого берега в створе села Ягодного с глубины 0,5 м батометром Молчанова ГР-18. Химический анализ проб воды осуществлялся по следующим показателям: хлорофилл «а» ($X_{л\ «а»}$), биохимическое потребление кислорода (БПК₅), перманганатная окисляемость (ПО) и химическое потребление кислорода (ХПК) в соответствии с действующими нормативными документами. Дополнительно в летний период наиболее жаркого 2021 г., когда процесс МРЦ был особенно активен, отбирались пробы воды для изучения состава фитопланктона, оценки численности и биомассы отдельных групп водорослей. Альгологические пробы были собраны одновременно с пробами воды для определения содержания хлорофилла - «а». Сбор и обработка материала проведены в соответствии с методами, принятыми в гидробиологии. Биомасса фитопланктона вычислена счетно-объемным методом.

Определение БПК₅, ПО и ХПК в лабораторных условиях осуществлялось титриметрическим методом. Традиционно показатели ПО и ХПК используются для количественной оценки РОВ и выражаются в мг/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 характеризует примерно 30-50% окисления органического вещества. ХПК - это показатель, дающий более полное представление о содержании РОВ, так как при его определении окисляется ≈ 90 % органических веществ [1]. По величине ХПК принято судить о суммарном содержании РОВ [33, 34].

Величина БПК₅ служит количественной оценкой лабильных, то есть наименее консервативных биохимически нестойких органических веществ. В первую очередь это касается автохтонных РОВ планктонного происхождения.

Определение $X_{л\ «а»}$ осуществлялось спектрофотометрическим методом. При «цветении» воды наиболее показателен в оценке обилия фитопланктона «чистый» хлорофилл «а» [22]. Контроль $X_{л\ «а»}$ необходим для определения границ начала и окончания, продолжительности и интенсивности процесса МРЦ. Методики химического анализа, диапазоны измеряемых концентраций и показатели точности измерений представлены в таблице 1. Параллельно осуществлялся контроль температуры воды, растворенного кислорода и рН.

Таблица 1. Диапазон и точность измерения Хл (мкг/дм³), БПК₅, ПО и ХПК (мгО/дм³)

Показатель	Диапазон измерения	Методика определения	Точность измерения*
Хл «а»	0,1 - 150,0	РД 52.24.784-2013	1,0 - 29,0
БПК ₅	0,5 - 5,0	ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97	±26 %
ПО	2,0 - 100	ПНД Ф 14.1:2:4.154-99	±10 %
ХПК	10 - 100	ПНД Ф 14.1:2:4.210-2005	±25 %

Примечание: * - границы погрешности при вероятности P=0,95

Традиционно по содержанию хлорофилла «а» оценивается биомасса фитопланктона. В июле и августе на Куйбышевском водохранилище доминируют цианобактерии, биомасса которых составляет 70-90% от общей биомассы фитопланктона. Поэтому в июле и августе содержание хлорофилла «а», в основном, характеризует биомассу цианобактерий.

Полученные результаты химического анализа группировались по месяцам в отдельные выборки: Хл «а», 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

Природный процесс массового развития цианобактерий (32) или цианобактериальное «цветение» воды (35) на Куйбышевском водохранилище наблюдается практически ежегодно в период летней межени. По результатам многолетних наблюдений установлено, что в этот период в структуре фитопланктона доминирует группа Cyanoprokaryota в присутствии Chlorophyta и Bacillariophyta [10, 36, 37]. Яркими представителями группы Cyanoprokaryota являются виды: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*.

Наиболее наглядно процесс МРЦ проявляется на плесах водохранилища в жаркие и маловодные годы при установлении антициклонической деятельности. При достижении

температуры воды 22 °С и отсутствии ветра происходит лавинообразное размножение цианобактерий, резко увеличивается их биомасса.

Экстремально жарким летом 2021 г. средняя температура воздуха (Т) на метеостанции Тольятти, расположенной в южной части Куйбышевского водохранилища, составила 23,8 °С и превысила многолетнюю норму на 4,7 °С. Наибольшая средняя месячная Т наблюдалась в июле и составила 24,6 °С. Превышение нормы для средней месячной температуре воздуха составило: в июне - на 4,5 °С, в июле - на 4,3 °С, в августе - на 5,3 °С. Общее количество летних дней с Т ≥ 22 °С составило – 64 (рис. 1 А).

Обращает на себя внимание значительные колебания Т, обусловленные синооптической цикличностью атмосферных процессов. При температуре воды (t) более 22°С ход Т включает 5 синооптических циклов. Первый цикл продолжался 15 дней с 20 июня по 04 июля. Наибольшая Т в цикле достигала 31,2 °С. Второй цикл наблюдался 5 дней с 07 по 11 июля. Наибольшая Т в цикле достигала 28,3 °С. Третий цикл наблюдался 12 дней с 13 по 24 июля. Наибольшая Т в цикле достигала 30,4 °С. Четвертый цикл наблюдался 10 дней с 28 июля по 05 августа. Наибольшая Т в цикле достигала 29,2 °С. Пятый цикл наблюдался 8 дней с 16 по 23 августа. Наибольшая Т в цикле достигала 32,2 °С. Изменение Т согласуется с ходом температуры воды. Синооптическая цикличность Т, обусловленная попеременным установлением ясной и штилевой погоды, находит отражение в формировании циклов процесса МРЦ или содержания Хл «а».

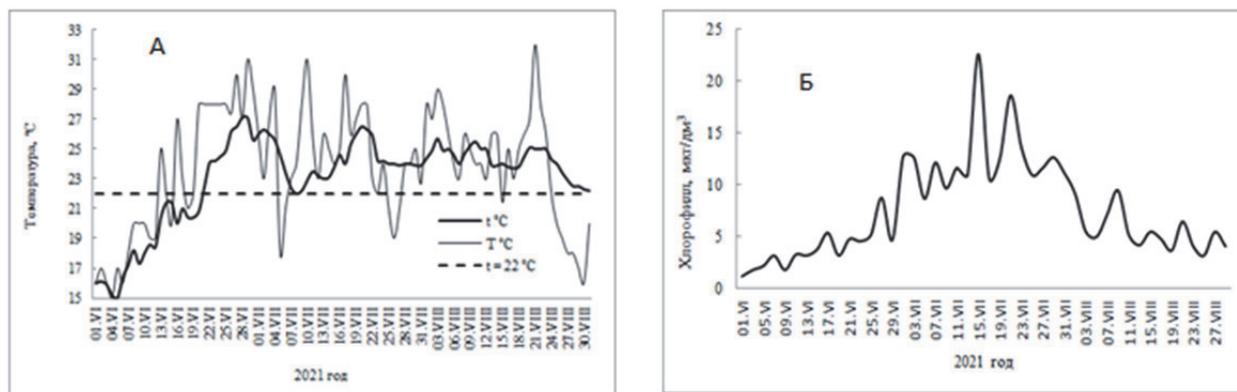


Рис. 1. Изменения температуры воздуха (Т), воды (t) (А) и Хл «а» (Б) летом 2021 г.

За летний период 2021 г. средняя t составила $23,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и превысила многолетнюю норму на $4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Превышение нормы для средней месячной t составило: в июне на $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, в июле – на $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, в августе – на $3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. В летней период выделены 2 благоприятных ($t > 22\text{ }^{\circ}\text{C}$) периода для процесса МРЦ. Первый период продолжался 17 дней, и наблюдался с 21 июня по 8 июля (рис. 1 А). Второй период продолжался 55 дней с 9 июля по 1 сентября. Общая продолжительность благоприятного периода за лето 2021 г. составила 72 дня, которые отличаются различной степенью интенсивности. Количество дней с низкой интенсивностью ($23\text{ }^{\circ}\text{C} > t \geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$) составило 10 дней, умеренной ($24\text{ }^{\circ}\text{C} > t \geq 23\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 15 дней, высокая ($25\text{ }^{\circ}\text{C} > t \geq 24\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 23 дня, очень высокой ($26\text{ }^{\circ}\text{C} > t \geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 24 дня и экстремально высокой ($t \geq 26\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 7 дней.

Среднее содержание $X_{\text{л}}$ «а» в летний период 2021 г. составило $7,4\text{ мкг/дм}^3$. Среднее содержание $X_{\text{л}}$ «а» в июне составило $3,7\text{ мкг/дм}^3$, в июле – $12,6\text{ мкг/дм}^3$ и в августе – $5,4\text{ мкг/дм}^3$. Наибольшее содержание $X_{\text{л}}$ «а» наблюдалось 15 июля и составило $22,6\text{ мкг/дм}^3$ при температуре воды $24,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, ясной и штилевой погоде (рис.1 Б). Только после 24 августа T резко снизилась и составила $15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 30 августа, Температура воды вплоть до 1 сентября была выше $22,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому содержание $X_{\text{л}}$ «а» весь август сохранялось высоким и изменялось в пределах $3,1\text{--}9,4\text{ мкг/дм}^3$ при среднем значении $5,4\text{ мкг/дм}^3$. Вариабельность содержания $X_{\text{л}}$ «а» особенно проявляется в июле и обусловлена синоптическими условиями, сменой циклонической и антициклонической деятельности в атмосфере. При антициклоне устанавливается солнечная и штилевая погода, которая создает благоприятные условия для бурного развития цианобактерий. При циклоне условия для процесса МРЦ ухудшаются.

Данные о структуре и биомассе фитопланктона, полученные на Приплотинном плесе в период 27 июня, 12 июля и 8 августа 2021 г. представлены в таблице 2. Биомассу фитопланктона в основном формирует группа *Cyanoprokaryota*. Вклад цианобактерий в биомассу фитопланкто-

на составляет 86 % в июне, 99 % в июле 99 % и 84 % в августе. Поэтому динамика содержания хлорофилла «а», основном, характеризует процесс МРЦ. В период активизации процесса МРЦ предполагается увеличение содержания легкоокисляемых растворенных органических веществ за счет экспорта метаболитов цианобактерий в водную массу.

По данным многолетних наблюдений в 2017-2022 гг. среднее содержание $X_{\text{л}}$ «а» за летний период (июнь-август) составило $6,2\text{ мкг/дм}^3$. С июня по июль включительно наблюдалось увеличение среднего содержания $X_{\text{л}}$ «а» в 3,5 раза с $3,1$ до $10,9\text{ мкг/дм}^3$ (табл. 3). Затем с августа наблюдалось уменьшение содержания $X_{\text{л}}$ «а» в 2,4 раза. В межгодовом разрезе максимальное содержание $X_{\text{л}}$ «а» наблюдалось в июле 2021 г. и составило $21,6\text{ мкг/дм}^3$, а минимальное наблюдалось холодным летом 2017 г. и изменялось в пределах $0,4\text{--}0,8\text{ мкг/дм}^3$. В сезонном разрезе наибольшее содержание $X_{\text{л}}$ «а» наблюдалось летом (июль-август) во время массового развития цианобактерий.

Среднее значение показателя БПК₅ за период 2017-2022 гг. составило $1,6\text{ мгО/дм}^3$. С июня по июль наблюдалось увеличение среднего значения БПК₅ на $0,8\text{ мг/дм}^3$ с $1,5$ до $2,3\text{ мгО/дм}^3$. В июле и августе показатель БПК₅ не менялся, оставаясь на уровне $2,3\text{ мгО/дм}^3$. В сентябре показатель снижается на $0,5\text{ мгО/дм}^3$ с $2,3$ до $1,8\text{ мгО/дм}^3$ (табл. 3). В межгодовом разрезе максимальное значение показателя БПК₅ наблюдалось в июле и августе жаркого 2021 г. и составило $2,3\text{--}2,5\text{ мгО/дм}^3$, а минимальное наблюдалось холодным 2017 г. и в июле и августе снизилось до $2,0\text{ мгО/дм}^3$. В сезонном разрезе наибольшие значения БПК₅ наблюдались летом (июль-август) и совпадали по времени с наступлением наибольших значений $X_{\text{л}}$ «а».

Динамика показателя БПК₅ характеризуется хорошо выраженной сезонной изменчивостью. Средние значения БПК₅ постепенно увеличиваются от зимы к лету с $1,0$ до $2,3\text{ мгО/дм}^3$, а затем уменьшается от лета к зиме с $2,3$ до $1,1\text{ мгО/дм}^3$. Подобные изменения БПК₅ согласуются с клас-

Таблица 2. Биомасса (мг/дм^3) фитопланктона на Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища в 2021 г.

Отделы водорослей	27 июня	12 июля	8 августа
Синезеленые/ <i>Cyanophyta</i> (<i>Cyanoprokaryota</i>)	4,25	6,82	5,16
Диатомовые / <i>Bacillariophyta</i>	0,47	0,03	0,63
Криптофитовые / <i>Cryptophyta</i>	0,02	0	0,02
Динофитовые / <i>Dinophyta</i>	0,06	0	0,08
Зеленые / <i>Chlorophyta</i>	0,13	0,01	0,19
Прочие	0	0	0
Сумма	4,93	6,85	6,08

Таблица 3. Содержание $X_{л}$ «а» (мкг/дм³) и показатели БПК₅, ПО, ХПК (мгО/дм³) 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
$X_{л}$ «а»												
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												
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
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
ПО												
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
ХПК												
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.

сическим представлением о том, что сезонный ход БПК₅ в основном зависит от изменения температуры и от исходной концентрации растворенного кислорода [14]. Исключение составляет непродолжительный период во время пропуска весеннего половодья через створ Жигулевского гидроузла, когда показатель БПК₅ несколько снижается.

Особый интерес вызывает летний период (июль-август), когда показатель БПК₅ продолжает увеличиваться и достигает наибольших величин (рис. 2). Рост содержания РОВ по БПК₅

совпадает с увеличением концентрации $X_{л}$ «а» или биомассой фитопланктона. А биомассу фитопланктона в июле и августе в основном формируют цианобактерии (табл. 2). Определение продолжительности и границ периода высоких значений $X_{л}$ «а» позволяет на графике сезонной изменчивости БПК₅ выделить зону (красный цвет) (рис. 2), образованную процессом цианобактериального «цветения» воды. Это вклад процесса МРЦ в трансформацию сезонной изменчивости содержания РОВ по БПК₅. В среднем вклад процесса МРЦ в увеличение concentra-

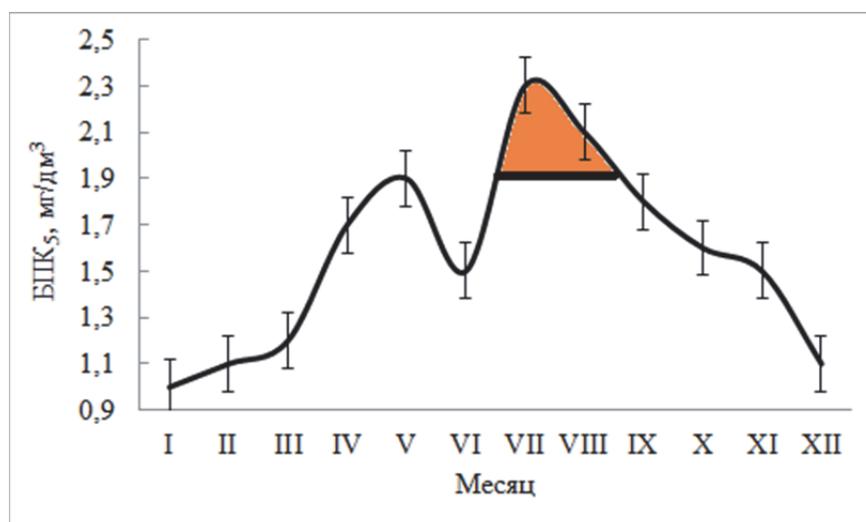


Рис. 2. Сезонная изменчивость БПК₅ с выделенной зоной вклада процесса МРЦ

ции БПК₅ составляет для летнего периода (июль-август) 20-25%.

В июле и августе показатель БПК₅ в воде Куйбышевского водохранилища, как правило, превышает гигиенический норматив качества (2,0 мгО/дм³) и требования к обеспечению безопасности для человека (СанПиН 1.2.3685-21) и предельно допустимую концентрацию (2,1 мгО/дм³), установленную для водных объектов рыбохозяйственного назначения (Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552).

Среднее значение показателя ПО за период 2017-2022 гг. составило 7,5 мгО/дм³. С июня по июль наблюдалось увеличение среднего значения ПО на 1,0 мгО/дм³ с 7,5 до 8,5 мгО/дм³. В течение июля и августа показатель ПО менялся незначительно, оставаясь на высоком уровне 8,5-8,6 мгО/дм³. В сентябре показатель снижается на 1,2 мгО/дм³ с 8,6 до 7,4 мгО/дм³ (табл. 3). В межгодовом разрезе максимальное значение показателя ПО наблюдалось в июле и августе жаркого 2021 г. и составило 11,5-12,1 мгО/дм³, а минимальное значение наблюдалось холодным 2017 г. и в июле и августе снизилось до 7,4-7,9 мгО/дм³. В сезонном разрезе наибольшие значения ПО наблюдались летом (июль-август) и совпадали по времени с наступлением наибольших значений X_л «а».

Сезонный ход показателя ПО характеризуется сначала ростом концентрации от зимы к лету с 7,0 до 8,6 мгО/дм³, а затем постепенным уменьшением от лета к зиме с 8,6 до 7,0 мгО/дм³. Исключение составляет непродолжительный период во время пропуска весеннего половодья через створ Жигулевского гидроузла, когда содержание несколько снижается с 7,8 до 7,5 мгО/дм³. В сезонном разрезе наибольшие значения приходится на июль-август в период высокого содержания X_л «а». За счет процесса МРЦ содер-

жание РОВ по перманганатной окисляемости увеличилось на 13-15 % (рис. 3).

В течение всего года показатель ПО в воде Куйбышевского водохранилища превышает допустимый норматив (7 мгО/дм³) по СанПиН 1.2.3685-21.

Среднее значение показателя ХПК за период 2017-2022 гг. оставило 25 мгО/дм³. С июня по июль наблюдалось увеличение значения ХПК на 2,0 мгО/дм³ с 25 до 27 мгО/дм³. В течение июля и августа показатель ХПК не менялся, оставаясь на уровне 27 мгО/дм³. В сентябре показатель уменьшился на 1,0 мгО/дм³ с 27 до 26 мгО/дм³ (табл. 3). В межгодовом разрезе максимальное значение показателя ХПК 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.

Сезонный ход показателя ХПК характеризуется сначала постепенным ростом от зимы к лету, когда содержание увеличивается с 23 до 27 мгО/дм³, а затем постепенным уменьшением от лета к зиме с 27 до 24 мгО/дм³. Наибольшие значения ХПК наблюдались летом (июль-август) и совпадали по времени с наступлением наибольших значений X_л «а». За счет процесса МРЦ содержание ХПК увеличилось на 4-6 % (рис. 4).

В течение всего года показатель ХПК 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 (БПК₅, ПО и ХПК) характеризуется сезонной изменчивостью, которая включает четыре периода (I, II, III и IV). Они отличаются друг от друга, как по продолжительности, так и

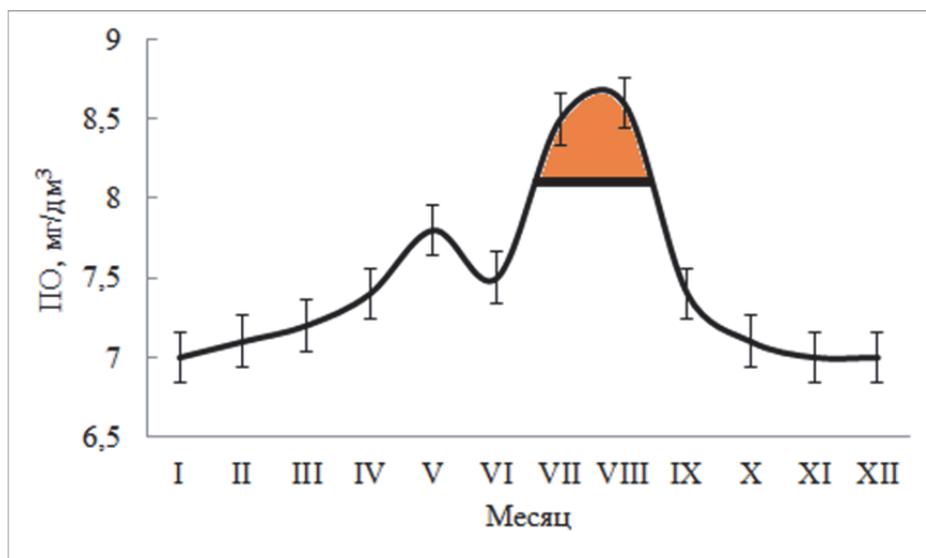


Рис. 3. Сезонная изменчивость ПО с выделенной зоной вклада процесса МРЦ

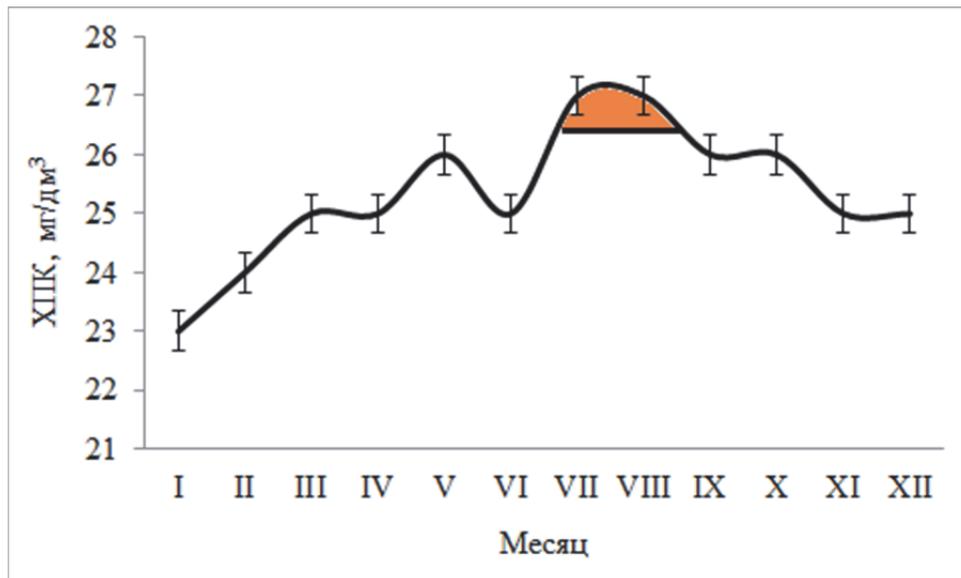


Рис. 4. Сезонная изменчивость ХПК с выделенной зоной вклада процесса МРЦ

разнонаправленными трендами увеличения или уменьшения содержания РОВ.

Период I характеризуется постепенным увеличением содержания растворенных органических веществ с января по май. Это самый продолжительный период сезонной изменчивости, протяженность которого составляет 6 месяцев с декабря по май. Это период зимней межени до начала пропуска стока весеннего половодья через створ Жигулевской ГЭС. В этот период наблюдается увеличение содержания РОВ в рамках БПК₅ с 1,0 до 1,9 мгО/дм³, в рамках ПО с 7,0 до 7,8 мгО/дм³, в рамках ХПК – с 23 до 26 мгО/дм³.

Период II характеризуется уменьшением содержания РОВ. Это самый короткий период сезонной изменчивости, его продолжительность составляет около одного месяца, с середины мая до середины июня, когда проходит весеннее половодье. В этот период наблюдается уменьшение содержания РОВ в рамках БПК₅ с 1,9 до 1,5 мгО/дм³, в рамках ПО с 7,8 до 7,5 мгО/дм³, в рамках ХПК – с 26 до 25 мгО/дм³.

Период III характеризуется увеличением содержания РОВ. Продолжительность этого периода сезонной изменчивости с июля по август и составляет 2 месяца. Это период действия процесса МРЦ и наибольшего содержания РОВ. В этот период наблюдается увеличение содержания РОВ в рамках БПК₅ с 1,5 до 2,3 мгО/дм³, в рамках ПО с 7,5 до 8,6 мгО/дм³, в рамках 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. В этот период наблюдается уменьшение содержания РОВ в рамках БПК₅ с 2,3 до 1,1 мгО/дм³, в рамках ПО с 8,6 до 7,0 мгО/дм³, в рамках ХПК – с 27 до 25 мгО/дм³.

Среди четырех периодов сезонной изменчивости обоснованную озабоченность вызывает период III, при котором содержание РОВ достигает наибольших величин и не соответствует нормативным требованиям по трем интегральным показателям БПК₅, ПО и ХПК. В этот период увеличение содержания РОВ в основном обуславливается процессом массового развития цианобактерий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований на Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища в период 2017-2022 гг. показывают, что содержание РОВ характеризуется хорошо выраженной сезонной изменчивостью интегральных показателей (БПК₅, ПО и ХПК) и включает четыре периода (I, II, III и IV), которые отличаются друг от друга продолжительностью и разнонаправленными трендами изменения содержания РОВ.

Процесс МРЦ трансформирует сезонную изменчивость содержания РОВ. В III периоде наблюдается увеличение БПК₅ на 20-25 %, ПО – на 13-15 %, ХПК – на 4-6 %. Степень трансформации сезонной изменчивости содержания РОВ зависит от интенсивности и продолжительности процесса МРЦ, который в свою очередь зависит от температуры воды и типа погодных условий. Содержание РОВ существенно увеличивается в жаркие маловодные годы при антициклоническом типе погоды за счет активизации процесса МРЦ.

В настоящее время качество воды Куйбышевского водохранилища уже не соответствует нормативным требованиям систематически по ХПК и ПО и периодически – по БПК₅. 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

1. *Алекин, О. А.* Основы гидрохимии / О. А. Алекин. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 415 с.
2. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государствах в конце XX столетия / отв. ред.: Н.И. Коронкевич, И. С. Зайцева. – М.: Наука, 2003. – 367 с.
3. *Беспалова, К.В.* Устойчивое водоснабжение городского населения в условиях «цветения» воды на водохранилищах Волги (на примере г. о. Тольятти) / К.В. Беспалова, А.В. Селезнева, В.А. Селезнев // Водоочистка. – 2016. – № 6. – С. 16-21.
4. Биологическая продуктивность и качество воды Волги и её водохранилищ. – М.: Наука, 1984. – 244 с.
5. *Бульон В.В.* Первичная продукция планктона внутренних водоемов / В.В. Бульон. – Л.: Наука, 1983. – 150 с.
6. *Бульон, В.В.* Вклад основных групп автотрофных организмов в первичную продукцию водоемов / В.В. Бульон // Водные ресурсы. 2004. – Т. 31. – № 1. – С. 92-102.
7. *Волкова, С.С.* Физико-химические особенности формирования состава органического вещества и карбонатной системы в малых озерах Западной Сибири: автор. дисс. кхн. Тюмень. – 2015. – 19 с.
8. *Винберг, Г.Г.* Взаимозависимость общегидробиологических и рыбохозяйственно – гидробиологических исследований / Г.Г. Винберг // Сб. научных трудов ГОСНИОРХ. – 1984. – Вып. 223. – С.3-10.
9. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Куйбышевское и Саратовское водохранилища. Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 272 с.
10. *Горохова, О.Г.* Состав и структура сообществ фитопланктона Усинского залива Куйбышевского водохранилища в период «цветения» воды / О.Г. Горохова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 5. – С. 122-130.
11. *Гусева, К.А.* Цветение воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним / К.А. Гусева // Труды Всесоюзного гидробиологического общества. – 1952. – Т. 4. – С. 3-92.
12. *Даценко, Ю. С.* Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-геохимические аспекты / Ю. С. Даценко. – М.: ГЕОС, 2007. – 252 с.
13. *Ефремова, Т.А.* Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в воде Онежского озера / Т.А. Ефремова, М.В. Зобкова // Труды Карельского научного центра РАН. – 2019. – № 9. – С. 60-75.
14. *Зенин, А. А.* Гидрохимия Волги и ее водохранилищ / А. А. Зенин. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 259 с.
15. *Зобкова, М. В.* 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.
16. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2022. Ростов-на-Дону, 2023. – 613 с.
17. *Корнева, Л.Г.* Цианобактериальное «цветение» воды в волжских водохранилищах и его токсичность / Л.Г. Корнева, Е.Н. Чернова // Цианопрокарисы/цианобактерии: систематика, экология, распространение, использование в биотехнологии. Материалы V Международной научной школы-конференции, посвященной 150-летию со дня рождения выдающегося альголога А. А. Еленкина (г. Москва, Россия, 13–16 июня 2023 г.). М.: – 2023. – С. 39-40.
18. Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / Под ред. Румянцева В.А., Драбковой В.Г. – СПб. Наука, 2002. – 326 с.
19. *Литвинов, А.С.* Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении / А.С. Литвинов, А. В. Законнова // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 9. – С. 91.
20. *Лозовик, П. А.* Аллохтонное и автохтонное органическое вещество природных вод: кинетические и термодинамические закономерности трансформации, количественный и качественный составы / П. А. Лозовик, М. В. Зобкова, А. В. Рыжиков, М. Б. Зобков, Т. А. Ефремова, А. В. Сабылина, Т. В. Ефремова // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 477. – № 6. – С. 728-732, DOI: 10.7868/S086956521736021X.
21. *Лозовик, П. А.* Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие / П. А. Лозовик, М. В. Мусатова // Географическая среда и живые системы. – 2013. – № 3. – С. 63-68.
22. *Минеева, Н.М.* Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ Волги (2019–2020 гг.) / Н.М. Минеева, И.В. Семадени, В.В. Соловьева О. С. Макарова // Биология внутр. вод. – 2022. – № 4. – С. 367-371. <https://doi.org/10.31857/S0320965222040210>
23. *Минеева, Н. М.* Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Нижней Волги / Н. М. Минеева, С. А. Поддубный, И. Э. Степанова, А. И. Цветков // Биология внутренних вод. – 2023. – № 1. – С. 53-64.
24. *Моисеенкова, Т. И.* Биогеохимия природных органических веществ в водах суши: распределение и изменчивость при потеплении климата / Т. И. Моисеенкова, М. И. Динуа // Геохимия. – 2023. – Т. 68. – № 2. – С. 187-196.

25. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России, МГУ имени М.В. Ломоносова. – 2023. – 687 с.
26. Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах // Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием. 10-14 сентября 2012 г., г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 465 с.
27. Паутова, В.Н. Продуктивность фитопланктона Куйбышевского водохранилища / В.Н. Паутова, В.И. Номоконова. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 1994. – 190 с.
28. Паутова, В.Н. Динамика содержания хлорофилла «а» в фитопланктоне Куйбышевского водохранилища / В.Н. Паутова, В.И. Номоконова // Гидробиологический журнал. – 2002. – Т. 38. – № 6. – С. 3-9.
29. Селезнева, К.В. Содержание растворенного кислорода в воде Куйбышевского водохранилища в условиях массового развития водорослей / К.В. Селезнева, А.В. Селезнева, В.А. Селезнев // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология. – 2022. – № 3. – С. 97-108.
30. Селезнева, К.В. Трансформация термического режима Куйбышевского водохранилища на фоне глобального потепления климата / К.В. Селезнева, А.В. Селезнева, В.А. Селезнев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2023. – № 3. – С.57-67.
31. Сиренко, Л. А. «Цветение» воды и эвтрофирование / Л. А. Сиренко, М. Я. Гавриленко. – Киев: Наук. думка, 1978. – 230 с.
32. Сухаревич, В. И. Глобальное распространение цианобактерий: причины и последствия (обзор) / В. И., Сухаревич, Ю. М. Поляк // Биология внутренних вод. – 2020. – № 6. – С. 562-572.
33. Скопинцев, Б.А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) / Б.А Скопинцев. – Л.: Гидрометеиздат, 1950. – 290 с.
34. Скопинцев, Б. А. Использование значений отношений различных показателей органического вещества природных вод для его качественной оценки / Б. А. Скопинцев, И. А. Гончарова // Современные проблемы региональной и прикладной гидрохимии. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. – С. 95-117.
35. Уманская, М.В. Цианобактериальные цветения воды в пресноводных континентальных водоемах: обзор / М.В. Уманская, М.Ю. Горбунов, Н.Г. Тарасова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25. – № 5. – С. 182-194.
36. Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. – Л.: Наука, 1989. – 302 с.
37. Фитопланктон Нижней Волги. Водохранилища и низовье реки. – СПб.: Наука, 2003. – 229 с.
38. *Algesten G., Sobek S., Bergstro A.K. et al.* 2003. Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone // *Global Change Biol.* (10), 141-147.
39. *Baines S.B., Pace M.L.* 1991. The production of dissolved organic matter by phytoplankton and importance to bacteria: Patterns across marine and freshwater systems // *Limnol. Oceanogr.* Vol. 36, № 6. P 1078-1090.
40. *Crapart C., Andersen T., Hessen D.O. et al.* 2021. Factors governing biodegradability of dissolved natural organic matter in Lake. *Water.* (13), 2210
41. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
42. *Liu F.* 2020. Dissolved organic carbon concentration and biodegradability across the global rivers: A meta-analysis *Sci. of The Tot. Env.* 818, 151828
43. *Hansell D.A., Carlson C.A., Suzuki Y.* 2002. Dissolved organic carbon export with North Pacific Intermediate Water formation // *Glob. Biogeochem. Cycle* (16), 1007.
44. *Kellerman A.M., Kothawala D.N., Dittmar T. et al.* 2015. Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics // *Nature Geoscience.* (8), 454-457.
45. *Kim S., Kaplan L.A., Hatcher P.G.* 2006. Biodegradable dissolved organic matter in a temperate and a tropical stream determined from ultra-high resolution mass spectrometry // *Limnol. Oceanogr.* (51), 1054-1063.
46. *Koehler B., von Wachenfeldt E., Kothawala D., Tranvik L.J.* 2012. Reactivity continuum of dissolved organic carbon decomposition in lake water. // *J. Geophys. Res.* 117.
47. *Paerl H.W., Paul V.J.* 2012. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria // *Water Res.* V. 46. P. 1349
48. *Pokrovsky O.S.* 2017. Allochthonous and autochthonous carbon in deep, organicrich and organicpoor lakes of the European Russian subarctic // *Boreal Environment research.* 22, 213-230.
49. *Rantala M.V., Nevalainen L., Rautio M. et al.* 2016. Sources and controls of organic carbon in lakes across the subarctic treeline // *Biogeochem.* (129), 235-253
50. *Seleznev V. A., Bepalova K. V., Selezneva A. V.* 2018. Seasonal variability of phosphate content in the Volga water under conditions of anthropogenic eutrophication of reservoirs // *Journal of Water Chemistry and Technology.* Vol. 40, Iss. 5. P. 307-311. DOI:https://doi.org/10.3103/S1063455X18050107.

IMPACT OF THE PROCESS OF MASS DEVELOPMENT OF CYANOBACTERIA ON THE FORMATION OF DISSOLVED ORGANIC SUBSTANCES IN THE WATER OF THE KUIBYSHEV RESERVOIR

© 2024 A.V. Selezneva

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

The study is aimed at determining the transformation of seasonal variability in the content of dissolved organic matter (DOM) under the influence of the process of mass development of cyanobacteria (MDC) in the Kuibyshev Reservoir. For this purpose, monitoring data on the Pridamtinny reach of the reservoir in the period 2017-2022 was used. Water samples were taken monthly from the surface horizon (0.5 m) for the following indicators: chlorophyll "a" (Chl "a"); biochemical oxygen demand (BOD₅); permanganate oxidation (PO) and chemical oxygen demand (COD). In the summer of 2021, the structure, abundance and biomass of phytoplankton were additionally determined. It has been established that the average annual content of DOM is: 1.6 mgO/dm³ according to BOD₅; 7.5 mgO/dm³ according to PO and 25 mgO/dm³ according to COD. Seasonal variability includes four periods, which are distinguished by multidirectional trends. In the first period, the DOM content increases from December to May and covers the winter low-water period before the onset of the spring flood. The second period is characterized by a decrease in the content of DOM and is observed during the spring flood. The third period is characterized by an increase in DOM content due to the MRC process and lasts 2 months during the summer low-water period. During this period, the highest DOM content is observed due to the MRC process. The fourth period is characterized by a decrease in DOM content and lasts from September to December. The MRC process, controlled by the Chl a content, transforms the seasonal variability of the DOM content. In summer (July-August) there is an increase in the DOM content under the influence of the MRC process by 20-25% for BOD₅, by 13-15% for PO and by 4-6% for COD. 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.

Key words: dissolved organic matter, seasonal variability, transformation, phytoplankton, influence of cyanobacteria, Kuibyshev Reservoir.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-5-142-154

EDN: XKCPBO

REFERENCES

1. Alekin, O. A. Osnovy gidrokhimii / O. A. Alekin. – L.: Gidrometeoizdat, 1970. – 415 s.
2. Antropogennyye vozdeystviya na vodnyye resursy Rossii i sopredel'nykh gosudarstvakh v kontse XX stoletiya / otv. red.: N.I. Koronkevich, I. S. Zaytseva. – M.: Nauka, 2003. – 367 s.
3. Bepalova, K.V. Ustoychivoye vodosnabzheniye gorodskogo naseleniya v usloviyakh «tsveteniya» vody na vodokhranilishchakh Volgi (na primere g. o. Togliatti) / K.V. Bepalova, A.V. Selezneva, V.A. Seleznev // Vodoochistka. – 2016. – № 6. – S. 16-21.
4. Biologicheskaya produktivnost' i kachestvo vody Volgi i yeyo vodokhranilishch. – M.: Nauka, 1984. – 244 s.
5. Bul'on V.V. Pervichnaya produktsiya planktona vnutrennikh vodoyemov / V.V. Bul'on. – L.: Nauka, 1983. – 150 s.
6. Bul'on, V.V. Vklad osnovnykh grupp avtotrofnykh organizmov v pervichnuyu produktsiyu vodoyemov / V.V. Bul'on // Vodnyye resursy. 2004. – T. 31. – № 1. – S. 92-102.
7. Volkova, S.S. Fiziko-khimicheskiye osobennosti formirovaniya sostava organicheskogo veshchestva i karbonatnoy sistemy v malykh ozerakh Zapadnoy Sibiri: avtor. diss. kkh. Tyumen». – 2015. – 19 s.
8. Vinberg, G. G. Vzaimozavisimost' obshchegidrobiologicheskikh i rybokhozyaystvenno – gidrobiologicheskikh issledovaniy / G.G. Vinberg // Sb. nauchnykh trudov GOSNIORKH. – 1984. – Vyp. 223. – S. 3-10.
9. Gidrometeorologicheskii rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR. Kuybyshevskoye i Saratovskoye vodokhranilishcha. L.: Gidrometeoizdat, 1978. – 272 s.
10. Gorokhova, O.G. Sostav i struktura soobshchestv fitoplanktona Usinskogo zaliva Kuybyshevskogo vodokhranilishcha v period «tsveteniya» vody / O.G. Gorokhova // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. – 2016. – T. 18. – № 5. – S. 122-130.
11. Guseva, K.A. Tsveteniye vody, yego prichiny, prognoz i mery bor'by s nim / K.A. Guseva // Trudy Vsesoyuznogo gidrobiologicheskogo obshchestva. – 1952. – T. 4. – S. 3-92.
12. Datsenko, Yu. S. Evtrofirovaniye vodokhranilishch. Gidrologo-geokhimicheskiye aspekty / Yu. S. Datsenko. – M.: GEOS, 2007. – 252 s.
13. Yefremova, T.A. Soderzhaniye, raspredeleniye i sootnosheniye osnovnykh komponentov organicheskogo veshchestva v vode Onezhskogo ozera / T.A. Yefremova, M.V. Zobkova // Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2019. – № 9.

- S. 60-75.
14. *Zenin, A.A.* Gidrokimiya Volgi i yeye vodokhranilishch / A. A. Zenin. – L.: Gidrometeoizdat, 1965. – 259 s.
 15. *Zobkova, M. V.* Organicheskoye veshchestvo i yego komponenty v poverkhnostnykh vodakh gumidnoy zony / M. V. Zobkova, T. A. Yefremova, P. A. Lozovik, A.V. Sabylina // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. – 2015. – № 12. – S. 115-120.
 16. Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii. Yezhegodnik. 2022. Rostov-na-Donu, 2023. – 613 s.
 17. *Korneva, L.G.* Tsianobakterial'noye «tsveteniye» vody v volzhskikh vodokhranilishchakh i yego toksichnost' / L.G. Korneva, Ye.N. Chernova // Tsianoprokarioty/tsianobakterii: sistematika, ekologiya, rasprostraneniye, ispol'zovaniye v biotekhnologii. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly-konferentsii, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya vydayushchegosya algologa A. A. Yelenkina (g. Moskva, Rossiya, 13–16 iyunya 2023 g.). M.: – 2023. – S. 39-40.
 18. Ladozhskoye ozero: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye / Pod red. Rumyantseva V.A., Drabkovoy V.G. – SPb. Nauka, 2002. – 326 s.
 19. *Litvinov, A.S.* Termicheskiy rezhim Rybinskogo vodokhranilishcha pri global'nom poteplenii / A.S. Litvinov, A. V. Zakonnova // Meteorologiya i gidrologiya. – 2012. – № 9. – S. 91.
 20. *Lozovik, P. A.* Allokhtonnoye i avtokhtonnoye organicheskoye veshchestvo prirodnykh vod: kineticheskiye i termodinamicheskiye zakonomernosti transformatsii, kolichestvennyy i kachestvennyy sostavy / P. A. Lozovik, M. V. Zobkova, A. V. Ryzhakov, M. B. Zobkov, T. A. Yefremova, A. V. Sabylina, T. V. Yefremova // Doklady Akademii nauk. – 2017. – T. 477. – № 6. – S. 728-732, DOI: 10.7868/S086956521736021X.
 21. *Lozovik, P. A.* Metodika razdeleniya organicheskogo veshchestva prirodnykh vod adsorbtsiyey na dietilaminoetiltsellyuloze na avtokhtonnyuyu i allokhtonnyuyu sostavlyayushchiye / P. A. Lozovik, M. V. Musatova // Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy. – 2013. – № 3. – S. 63-68.
 22. *Mineyeva, N.M.* Soderzhaniye khlorofilla i sovremennoye troficheskoye sostoyaniye vodokhranilishch Volgi (2019–2020 gg.) / N.M. Mineyeva, I.V. Semadeni, V.V. Solov'yeva O. S. Makarova // Biologiya vnutr. vod. – 2022. – № 4. – S. 367-371. <https://doi.org/10.31857/S0320965222040210>
 23. *Mineyeva, N. M.* Abioticheskiye faktory i ikh rol' v razvitiy fitoplanktona vodokhranilishch Nizhney Volgi / N. M. Mineyeva, S. A. Poddubnyy, I. E. Stepanova, A. I. Tsvetkov // Biologiya vnutrennikh vod. – 2023. – № 1. – S. 53-64.
 24. *Moiseyenkova, T. I.* Biogeokhimiya prirodnykh organicheskikh veshchestv v vodakh sushi: raspredeleniye i izmenchivost' pri poteplenii klimata / T. I. Moiseyenkova, M. I. Dinua // Geokhimiya. – 2023. – T. 68. – № 2. – S. 187-196.
 25. O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2022 godu. Gosudarstvennyy doklad. M.: Minprirody Rossii, MGU imeni M.V. Lomonosova. – 2023. – 687 s.
 26. Organicheskoye veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vodoyemakh i morskikh vodakh // Materialy V Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiyem. 10-14 sentyabrya 2012 g., g. Petrozavodsk, Respublika Kareliya, Rossiya. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN. – 465 s.
 27. *Pautova, V.N.* Produktivnost' fitoplanktona Kuybyshevskogo vodokhranilishcha / V.N. Pautova, V.I. Nomokonova. – Tol'yatti: IEVB RAN, 1994. – 190 s.
 28. *Pautova, V.N.* Dinamika soderzhaniya khlorofilla «a» v fitoplanktone Kuybyshevskogo vodokhranilishcha / V.N. Pautova, V.I. Nomokonova // Gidrobiologicheskyy zhurnal. – 2002. – T. 38. – № 6. – S. 3-9.
 29. *Selezneva, K.V.* Soderzhaniye rastvorenogo kisloroda v vode Kuybyshevskogo vodokhranilishcha v usloviyakh massovogo razvitiya vodorosley / K.V. Selezneva, A.V. Selezneva, V.A. Seleznev // Vestnik VGU, Seriya: Geografiya. Geoekologiya. – 2022. – № 3. – S. 97-108.
 30. *Selezneva, K.V.* Transformatsiya termicheskogo rezhima Kuybyshevskogo vodokhranilishcha na fone global'nogo potepleniya klimata / K.V. Selezneva, A.V. Selezneva, V.A. Seleznev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. – 2023. – № 3. – S. 57-67.
 31. *Sirenko, L. A.* «Tsveteniye» vody i evtrofirovaniye / L. A. Sirenko, M. YA. Gavrilenko. – Kiyev: Nauk. dumka, 1978. – 230 s.
 32. *Sukharevich, V. I.* Global'noye rasprostraneniye tsianobakteriy: prichiny i posledstviya (obzor) / V. I., Sukharevich, YU. M. Polyak // Biologiya vnutrennikh vod. – 2020. – № 6. – S. 562-572.
 33. *Skopintsev, B.A.* Organicheskoye veshchestvo v prirodnykh vodakh (vodnyy gumus) / B.A. Skopintsev. – L.: Gidrometeoizdat, 1950. – 290 s.
 34. *Skopintsev, B. A.* Ispol'zovaniye znacheniy otnosheniy razlichnykh pokazateley organicheskogo veshchestva prirodnykh vod dlya yego kachestvennoy otsenki / B. A. Skopintsev, I. A. Goncharova // Sovremennyye problemy regional'noy i prikladnoy gidrokhemii. – L.: Gidrometeoizdat, 1987. – S. 95-117.
 35. *Umanskaya, M.V.* Tsianobakterial'nyye tsveteniya vody v presnovodnykh kontinental'nykh vodoyemakh: obzor / M.V. Umanskaya, M.YU. Gorbunov, N.G. Tarasova // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. – 2023. – T. 25. – № 5. – S. 182-194.
 36. Ekologiya fitoplanktona Kuybyshevskogo vodokhranilishcha. – L.: Nauka, 1989. – 302 s.

37. Fitoplankton Nizhney Volgi. Vodokhranilishcha i nizovyye reki. – SPb.: Nauka, 2003. – 229 s.
38. *Algesten G., Sobek S., Bergstro A.K. et al.* 2003. Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone // *Global Change Biol.* (10), 141-147.
39. Baines S.B., Pace M.L. 1991. The production of dissolved organic matter by phytoplankton and importance to bacteria: Patterns across marine and freshwater systems // *Limnol. Oceanogr.* Vol. 36, № 6. P 1078-1090.
40. *Crapart C., Andersen T., Hessen D.O. et al.* 2021. Factors governing biodegradability of dissolved natural organic matter in Lake. *Water.* (13), 2210
41. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
42. *Liu F.* 2020. Dissolved organic carbon concentration and biodegradability across the global rivers: A meta-analysis *Sci. of The Tot. Env.* 818, 151828
43. *Hansell D.A., Carlson C.A., Suzuki Y.* 2002. Dissolved organic carbon export with North Pacific Intermediate Water formation // *Glob. Biogeochem. Cycle* (16), 1007.
44. *Kellerman A.M., Kothawala D.N., Dittmar T. et al.* 2015. Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics // *Nature Geoscience.* (8), 454-457.
45. *Kim S., Kaplan L.A., Hatcher P.G.* 2006. Biodegradable dissolved organic matter in a temperate and a tropical stream determined from ultra-high resolution mass spectrometry // *Limnol. Oceanogr.* (51), 1054-1063.
46. *Koehler B., von Wachenfeldt E., Kothawala D., Tranvik L.J.* 2012. Reactivity continuum of dissolved organic carbon decomposition in lake water. // *J. Geophys. Res.* 117.
47. *Paerl H.W., Paul V.J.* 2012. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria // *Water Res.* V. 46. P. 1349
48. *Pokrovsky O.S.* 2017. Allochthonous and autochthonous carbon in deep, organicrich and organicpoor lakes of the European Russian subarctic // *Boreal Environment research.* 22, 213-230.
49. *Rantala M.V., Nevalainen L., Rautio M. et al.* 2016. Sources and controls of organic carbon in lakes across the subarctic treeline // *Biogeochem.* (129), 235-253
50. *Seleznev V. A., Bespalova K. V., Selezneva A. V.* 2018. Seasonal variability of phosphate content in the Volga water under conditions of anthropogenic eutrophication of reservoirs // *Journal of Water Chemistry and Technology.* Vol. 40, Iss. 5. P. 307-311. DOI:https://doi.org/10.3103/S1063455X18050107.