

УДК 574.52

## ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕТНЕГО ДЕФИЦИТА РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ВОДЕ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2024 К.В. Селезнева, В.А. Селезнев

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

Статья поступила в редакцию 08.07.2024

Содержание растворенного кислорода является важнейшим показателем экологического состояния и качества воды Куйбышевского водохранилища, используемого для питьевого водоснабжения, рыбного хозяйства и рекреации. Существует мнение, что на формирование кислородного режима существенное влияние оказывает процесс массового развития цианобактерий. Поэтому количественная оценка сезонной изменчивости растворенного кислорода и его дефицита в условиях массового развития цианобактерий является весьма актуальной. Систематические наблюдения проводились в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища. Результаты исследований показывают, что сезонная изменчивость концентрации растворенного кислорода включает четыре периода, отличающиеся различной направленностью процессов формирования кислородного режима. Внутри года наблюдаются два минимума содержания растворенного кислорода: зимний и летний. В летний минимум возникает дефицит растворенного кислорода, когда его концентрация снижается до критических значений и составляет 4–5 мг/дм<sup>3</sup>. На формирование летнего минимума кислорода существенное влияние оказывают: повышение температуры воды и процесс массового развития цианобактерий. В результате фотосинтезирующей аэрации образуется тонкий перенасыщенный кислородом поверхностный слой воды, который нарушает процесс абсорбции кислорода из атмосферы. В условиях роста биогенной нагрузки и глобального потепления климата интенсивность и масштаб процесса массового развития цианобактерий на Куйбышевском водохранилище будет только увеличиваться, что приведет к дальнейшему росту дефицита кислорода, ухудшению качества воды и возникновению рисков водопользования и ведения рыбного хозяйства.

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

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-5-132-141

EDN: XECXNG

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда  
(номер проекта 23-27-10008).*

### ВВЕДЕНИЕ

Для жизнедеятельности почти всех водных организмов, за исключением некоторых бактерий, необходим растворенный кислород (РК), который находится в воде в виде гидратированных молекул  $O_2$ . Содержание РК зависит от температуры, атмосферного давления, степени турбулизации воды, количества осадков, минерализации воды и др. На содержание РК в воде влияют две группы противоположно направленных процессов: одни увеличивают концентрацию кислорода,

другие уменьшают ее. К первой группе относят: поглощение кислорода из атмосферы (абсорбция); выделение кислорода водной растительностью в процессе фотосинтеза; поступление в водоемы с дождевыми и снеговыми водами, которые обычно пересыщены кислородом.

Основными источниками поступления кислорода в водоем являются атмосфера и фотосинтезирующие растения. В атмосфере содержится около 21% кислорода. В холодной воде, находящейся в контакте с атмосферным воздухом, в состоянии насыщения растворено не более 15 мг/дм<sup>3</sup> кислорода, т. е. массовая доля кислорода составляет примерно 0,0015. Столь малые концентрации затрудняют извлечение кислорода водными организмами. Фотосинтез — второй основной источник кислорода для водных экосистем. Кислород является побочным продуктом фотосинтеза и выделяется в воду фитопланктоном и высшей водной растительностью. Однако фотосинтез и продуцирование кислорода воз-

*Селезнева Ксения Владимировна, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов ИЭВБ РАН, доцент ТГУ.*

*E-mail: kvbespalova@yandex.ru*

*Селезнев Владимир Анатольевич, доктор технических наук, кандидат географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории мониторинга водных объектов. E-mail: seleznev53@mail.ru*

можно только при наличии света. Те водоросли, которые в дневное время выделяют кислород, ночью потребляют его. В солнечные дни количество кислорода, выделяемого фотосинтезирующими растениями, может быть достаточно для пересыщенных поверхностных вод кислородом. В этом случае он выделяется в атмосферу. Содержание кислорода в естественных водоемах минимально на рассвете, максимальные концентрации обычно наблюдаются в середине дня или несколько позднее. Определение концентрации кислорода для выявления возможного его дефицита следует проводить на рассвете.

*Абсорбция кислорода* из атмосферы происходит на поверхности водного объекта. Скорость этого процесса повышается с понижением температуры, с повышением давления и понижением минерализации. Благодаря аэрации происходит обогащение глубинных слоев воды кислородом в результате турбулентного перемешивания водных масс за счет ветрового волнения, течений, вертикальной температурной циркуляции и т.д.

Турбулентность раздела «вода – воздух» значительно увеличивает площадь контакта двух сред: чем больше площадь поверхности раздела, тем больше скорость переноса кислорода. Диффузия кислорода столь мала, что не имеет практического значения.

*Фотосинтетическое выделение кислорода* происходит при ассимиляции диоксида углерода водной растительностью (прикрепленными, плавающими растениями и фитопланктоном). Процесс фотосинтеза протекает тем сильнее, чем выше температура воды, интенсивность солнечного освещения и больше биогенных (питательных) веществ в воде. Продуцирование кислорода происходит в поверхностном слое водоема, глубина которого зависит от прозрачности воды (для каждого водоема и сезона может быть различной, от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров).

Ко второй группе относят следующие процессы: дыхание организмов, расход кислорода при разложении органических веществ и *химическое окисление*. Скорость потребления РК увеличивается с повышением температуры, количества бактерий и других водных организмов и веществ, подвергающихся химическому и биохимическому окислению. Кроме того, уменьшение содержания кислорода в воде может происходить вследствие выделения его в атмосферу из поверхностных слоев, пересыщенных кислородом. Концентрация кислорода в воде определяет величину окислительно-восстановительного потенциала и в значительной мере направление и скорость процессов химического и биохимического окисления органических и неорганических соединений.

Основные закономерности кислородного режима Куйбышевского водохранилища, в основном, изучены [2-19]. После создания водохранилища в 1957 г. кислородный режим претерпел серьезные изменения по сравнению с речными условиями, главное из которых, установление вертикальной стратификации в содержании РК. В поверхностном слое воды содержание РК близко к насыщению, а в придонных слоях наблюдается его недостаток.

Соотношение интенсивности процессов первой и второй групп определяют содержание РК в воде. Критические условия с минимальным содержанием РК наблюдаются в маловодные годы, а в сезонном разрезе - в период зимней межени (перед началом весеннего половодья) и в период летней межени (июль, август) из-за повышенного прогрева (>20°C) глубоких слоев воды. Несмотря на достигнутые успехи, недостаточно изучен процесс формирования кислородного режима в условиях массового развития цианобактерий (МРЦ), когда наблюдается летний дефицит РК и возникают риски использования водохранилища для ведения рыбного хозяйства и питьевого водоснабжения. В условиях роста биогенной нагрузки и глобального потепления климата актуальность изучения кислородного режима приобретает особое значение. Целью исследований является количественная оценка сезонной изменчивости концентрации РК и причин её, вызывающих по многолетним данным, полученным на стационарном пункте наблюдений и по единой методике.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Куйбышевское водохранилище является самым крупным в Волжско-Камском каскаде [1] и используется в качестве источника хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также для нужд рыбного хозяйства и рекреации. Его экологическое и санитарно-гигиеническое состояние во многом определяется содержанием в воде растворенного кислорода (РК) в различные сезоны года. Особую озабоченность вызывает снижение концентрации РК ниже нормативных значений, что свидетельствует о загрязнении водохранилища и об изменении биологических процессов в водоеме. Площадь водохранилища при нормальном подпорном уровне составляет 6450 км<sup>2</sup>, а общая длина - 750 км с учетом волжской и камской веток. Ширина самого большого плеса водохранилища в районе слияния Волги и Камы составляет 40 км. Наибольшая глубина водохранилища на Приплотинном плесе составляет 41 м [20]. Морфология водохранилища сложная и характеризуется чередованием широких плесов и сужений, хорошо выраженным глубоководным руслом и мелководной поймой, а также наличием

ем обширных заливов в районах подпора боковых притоков.

Многолетние гидрохимические наблюдения проводились систематически, начиная с 2001г. Стационарный пункт наблюдений расположен на правом берегу, в нижнем бьефе Жигулевского гидроузла. Ширина водохранилища в пункте наблюдения составляет 1,5 км, а глубина на вертикали отбора проб воды составляет 6-9 м. В данном пункте наблюдений из-за работы гидроузла происходит интенсивное перемешивание водных масс Куйбышевского водохранилища и, практически по всей глубине водоема устанавливается однородная водная масса по физико-химическим показателям [21, 22].

Достоверная оценка сезонной изменчивости концентрации РК возможна только в случае, если она основана на однородном материале, собранном унифицировано по одной и той же методике. Пробы воды для гидрохимического анализа отбирались на стационарном пункте наблюдений ежемесячно. Дискретность отбора проб воды обоснована предварительными учащенными наблюдениями (4 раза в месяц). Для исключения влияния на содержание кислорода суточного и недельного режимов регулирования водного стока [23] пробы воды отбирались в определенный день недели (среда) и определенное время суток (11 часов местного времени). Для количественной оценки сезонных изменений репрезентативные выборки для каждого месяца подвергались статистической обработке.

Растворенный кислород является весьма неустойчивым компонентом химического состава вод. Поэтому при его определении особо тщательно осуществлялся отбор проб воды: исключался контакт воды с воздухом до фиксации кислорода. Наряду с определением абсолютных значений концентрации РК, оценивалось относительное содержание **кислорода в воде**, выраженное в процентах его нормального содержания (степень **насыщения кислородом**). Для расчета степени насыщения кислородом определялись температуры **воды и** атмосферное давление.

Отбор проб воды проводили батометром Молчанова ГР-18, к крану которого прикреплена резиновая трубка длиной 25 см. При изъятии воды

из батометра сводилась к минимуму возможность контакта пробы с атмосферой во избежание растворения кислорода из воздуха или улетучивания его из пробы в атмосферу. Не допускалось взбалтывание и перемешивание пробы воды. Отбор проб воды и определение массовой концентрации РК выполнялось в соответствии с руководящими документами Росгидромета (табл. 1).

В периоды проведения экспедиционных работ на акватории Куйбышевского водохранилища на судне «Биолог» в качестве дополнительного средства измерения использовалась информационно-измерительная система качества воды «Хитон». С помощью этой системы оценивались пространственные неоднородности водной массы по температуре и электропроводности воды, рН, растворенному кислороду и хлорофиллу «а». В период проведения экспедиционных работ осуществлялся контроль метеорологических и гидрологических параметров, включая температуру воздуха, скорость ветра, количество ясных дней, скорость и направление течения, ветровое волнение и глубина водохранилища.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты наблюдений в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища показали, что средняя концентрация РК за многолетний период составила  $9,5 \pm 0,3$  мг/дм<sup>3</sup>. Среднегодовые концентрации РК менялись незначительно: наибольшая концентрация составила  $10,3 \pm 0,3$  мг/дм<sup>3</sup>, а наименьшая –  $9,0 \pm 0,3$  мг/дм<sup>3</sup>.

Внутригодовые концентрации РК менялись весьма существенно. Многолетние среднемесячные концентрации растворенного кислорода ( $PK_{cp}$ ) изменялись внутри года в пределах от  $6,7 \pm 0,2$  до  $12,7 \pm 0,4$  мг/дм<sup>3</sup> (табл. 2) с наименьшими значениями в период летней межени (июль, август). Многолетние максимальные среднемесячные концентрации ( $PK_{max}$ ) изменялись от  $8,2 \pm 0,3$  (август) до  $14,2 \pm 0,5$  мг/дм<sup>3</sup> (декабрь), а минимальные ( $PK_{min}$ ) – от  $4,1 \pm 0,2$  мг/дм<sup>3</sup> (август) до  $11,7 \pm 0,4$  мг/дм<sup>3</sup> (январь). Амплитуда сезонных колебаний концентрации растворенного кислорода, в основном, увеличивалась за счет уменьшения концентрации кислорода в летний период.

**Таблица 1.** Диапазон и точность измерения концентрации растворенного кислорода

Период наблюдений, год	Нормативный документ	Диапазон измерений, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	Показатель точности, $\pm \Delta^*$ , мг/дм <sup>3</sup>	
			мг/дм <sup>3</sup>	%
2001-2005	ПНД Ф 14.1:2.100-97	$4,0 < PK \leq 10,0$	-	30
		$10,0 < PK \leq 80,0$	-	24
с 2006	РД 52.24.419-2005	$1,0 < PK \leq 3,0$	$0,10 \times PK$	-
		$3,0 < PK \leq 15,0$	$0,032 \times PK$	-

Примечание:  $\Delta^*$  - границы абсолютной и относительной погрешности при вероятности P = 0,95

Таблица 2. Сезонные изменения концентрации РК<sub>ср</sub>, РК<sub>max</sub>, РК<sub>min</sub>, мг/дм<sup>3</sup>

Месяц											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
РК <sub>ср</sub>											
12,3	10,9	9,1	8,6	9,6	8,3	7,1	6,7	7,8	9,2	11,1	12,7
РК <sub>max</sub>											
13,1	12,5	11,0	10,7	10,7	9,7	9,0	8,2	9,2	11,1	12,8	14,2
РК <sub>min</sub>											
11,7	9,6	7,6	7,0	7,9	6,8	5,0	4,1	6,4	6,7	9,7	11,6

Содержание РК характеризуется ярко выраженной сезонной изменчивостью, для которой характерны два минимума концентрации: зимний и летний (рис. 1). Зимний минимум наблюдался в марте в конце ледостава, а летний минимум – в июле-августе при наибольших температурах воды. При этом, дефицит кислорода в летний минимум более существенный, чем в зимний минимум.

Сезонная изменчивость концентрации РК включает четыре периода (А, В, С и D), которые отличаются друг от друга разнонаправленными трендами увеличения или уменьшения концентрации РК (рис. 1). Сезонная изменчивость концентрации РК обусловлена взаимодействием противоположно направленных факторов, основными из которых являются: абсорбция кислорода в воду из атмосферы; поступление кислорода в воду в результате фотосинтеза водорослей; потребление кислорода на биохимическое окисление органических и минеральных веществ; потребление кислорода на дыхание гидробионтов. В периоды А и С складывается отрицательный, а для

периодов В и D - положительный кислородный баланс.

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

Период (В) продолжается с апреля по май, это самый короткий период сезонной изменчивости кислорода и характеризуется положительным кислородным балансом. В этот период наблюдается увеличение концентрации кислорода с 8,6 до 9,6 мг/дм<sup>3</sup>. Несмотря на рост температуры воды, наблюдается увеличение концентрации кислорода, в основном за счет заполнения водохранилища почвенно-поверхностными водами с высоким содержанием кислорода, поступления кислорода из атмосферы и в результате фотосинтеза водорослей.

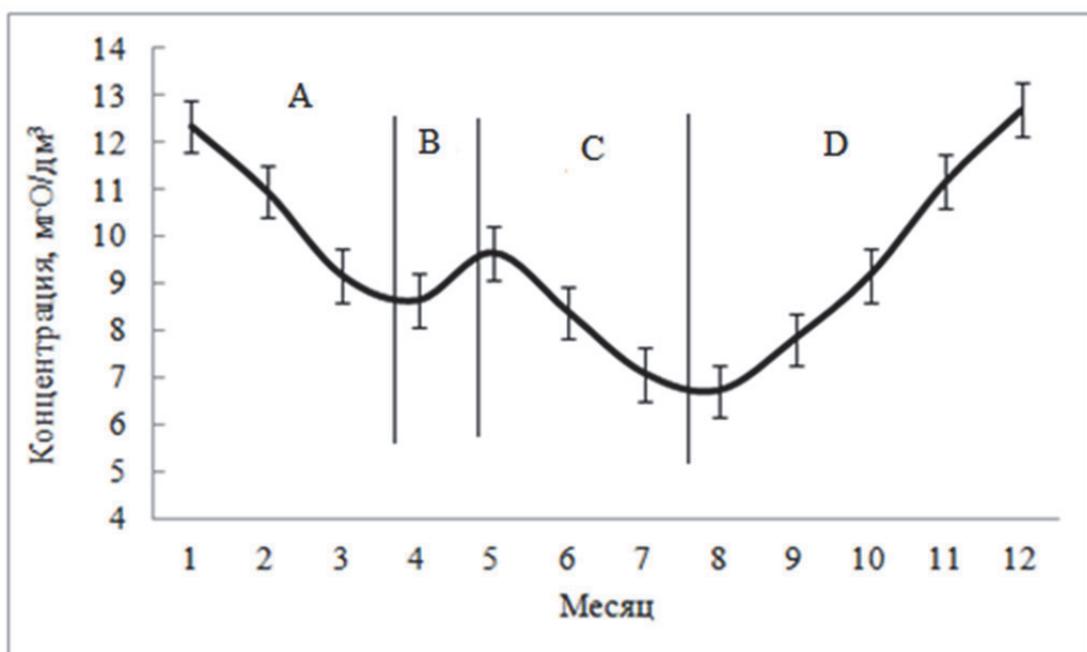


Рис. 1. Четыре разнонаправленных периода сезонной изменчивости концентрации РК (τ, ⊥ – планки погрешностей)

Период **(С)** продолжается с мая по август и характеризуется отрицательным кислородным балансом. В этот период наблюдается уменьшение концентрации кислорода с 9,6 до 6,7 мг/дм<sup>3</sup>. Уменьшение содержания кислорода обусловлено повышением температуры воды, постепенным заполнением водохранилища грунтовыми водами с низким содержанием кислорода, потреблением кислорода на биохимическое окисление органических и минеральных веществ. Выделение кислорода в результате фотосинтеза водорослей не в состоянии остановить уменьшение кислорода. В конце этого периода наблюдаются самые низкие концентрации РК.

Период **(D)** продолжается с августа по декабрь и характеризуется положительным кислородным балансом. В этот период наблюдается увеличение концентрации кислорода с 6,7 до 12,7 мг/дм<sup>3</sup>. Увеличение содержания кислорода обусловлено понижением температуры воды, интенсификацией процесса поступления кислорода из атмосферы. В этот период процессы, обуславливающие поступление кислорода, преобладают над процессами, ответственными за расходование кислорода в водных массах водохранилища.

Полученные результаты убедительно доказывают, что минимальная концентрация РК в диапазоне сезонной изменчивости наблюдается на границе периодов **С** и **D** в августе и среднемесячная концентрация РК составляет 6,7 мг/дм<sup>3</sup>. Однако, в отдельные годы концентрация РК снижается до 4,1 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 2). Столь низкие значения концентрации РК уже не соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к качеству воды Куйбышевского водохранилища, используемого для нужд рыбного хозяйства.

Установленные закономерности сезонной изменчивости концентрации РК (рис. 1) остаются неизменными год от года. А вот абсолютные значения концентраций РК ежегодно меняются, особенно летом, и зависят от широкого спектра гидрометеорологических условий, включая та-

кие показатели, как температура воды, расход и уровень воды, продолжительность безоблачной и безветренной погоды. В жаркие и маловодные годы летний минимум усиливается, и концентрация РК снижается до уровня ниже допустимого, менее 6,0 мг/дм<sup>3</sup>. Наглядным примером является аномальный 2010 год, когда летом температура воздуха была существенно выше, а осадки ниже нормы. Летом 2010 года наибольшая среднемесячная температура воды (*t*) наблюдалась в июле и составила 23,5°C, а в августе она понизилась до 21,2°C (табл. 3).

По продолжительности жарких и безветренных дней 2010 год является экстремальным в Поволжье за весь период инструментальных метеорологических наблюдений, что обусловлено длительным стоянием блокирующего антициклона. Погода в антициклоне сопровождалась большим количеством ясных и штилевых дней. Из-за маловодья на Средней и Нижней Волге в августе средний месячный расход воды сократился по сравнению с нормой в 3 раза, уровень воды понизился до критических значений. В июле и августе на акватории водохранилища сложились благоприятные условия для процесса МРЦ, когда биомасса цианобактерий (по хлорофиллу «а») превысила многолетнюю норму в 6-8 раз.

Результаты экспедиционных исследований в 2010 г. показали, что процессом МРЦ была охвачена практически вся акватория водохранилища. В составе фитопланктона в основном присутствовала группа цианобактерий [24], отдельные представители которых способны продуцировать токсины [25]. Интенсивность и продолжительность процесса МРЦ зависели от гидрометеорологических условий и режима регулирования водного стока на Жигулевском, Чебоксарском и Нижнекамском гидроузлах [26].

В период действия процесса МРЦ существенным образом изменялся гидрохимический режим водохранилища. По мере роста биомассы водорослей (по хлорофиллу «а») концентрация биогенных веществ, в частности нитратов и

**Таблица 3.** Сезонные изменения *t*, РК<sub>р</sub>, РК<sub>ф</sub>, ДРК, СНРК в аномальном году (2010 г.)

Месяц												
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
<i>t</i> , °C												
0	0	0	0	9,6	20,4	24,3	25,7	18,4	11,0	5,9	0	
РК <sub>р</sub> , мг/дм <sup>3</sup>												
14,7	14,7	14,7	14,7	11,4	9,0	8,3	8,1	9,3	11,0	12,5	14,7	
РК <sub>ф</sub> , мг/дм <sup>3</sup>												
12,2	10,6	8,3	9,8	10,2	8,6	5,8	4,1	6,6	10,1	10,8	12,9	
ДРК, мг/дм <sup>3</sup>												
2,5	4,1	6,4	3,9	1,2	0,4	2,5	4,0	2,7	1,1	1,7	1,7	
СНРК, %												
83,0	72,1	56,5	66,7	89,4	95,6	69,9	50,6	71,0	91,8	86,4	87,8	

фосфатов в воде, уменьшалась. При этом, увеличивалась цветность воды, у воды появлялся неприятный запах. Значение pH смещалось в сторону щелочной реакции, возрастало содержание взвешенных и растворенных органических веществ [27]. В целом, санитарно-гигиеническое состояние водохранилища, как источника питьевого водоснабжения, резко ухудшалось.

Детальное вертикальное зондирование водной массы водохранилища с использованием ИИС «Хитон» показало, что наблюдалось перенасыщение воды растворенным кислородом. В результате фотосинтезирующей аэрации в тонком поверхностном слое (1-3 см) степень насыщения воды кислородом в русловой части водохранилища составляла 100-120%, а в левобережной мелководной пойме и в заливах - 150-200%.

Концентрация  $PK_{\phi}$  в июле составила 6,4 мг/дм<sup>3</sup>, в августе – 4,1 мг/дм<sup>3</sup>, а степень насыщения растворенным кислородом (СНРК) составила 75,6% и 46,6%, соответственно. Значительный дефицит растворенного кислорода (ДРК), как разность между концентрацией равновесного ( $PK_p$ ) и фактического ( $PK_{\phi}$ ) растворенного кислорода, наблюдался в марте и составил 6,3 мг/дм<sup>3</sup> и в августе – 4,7 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 3). Однако, в марте, несмотря на значительный дефицит кислорода, абсолютные значения фактического растворенного кислорода ( $PK_{\phi}$ ), оставались достаточно высокими (8,3 мг/дм<sup>3</sup>). Следовательно, с экологической точки зрения самым неблагоприятным периодом по содержанию растворенного кислорода следует считать август месяц, когда фактическая концентрация  $PK_{\phi}$  почти на 2 мг/дм<sup>3</sup> была меньше допустимой концентрации (6,0 мг/дм<sup>3</sup>).

Исследование причин формирования летнего минимума и дефицита растворенного кислорода представляет научный интерес и имеет практическую значимость. При изучении сезонной динамики растворенного кислорода в аномальном 2010 году и факторов её определяющих обращает на себя внимание тот факт, что температура воды от июля к августу более, чем на 2 °C с 23,5 до 21,2 °C, что должно было бы привести к увеличению концентрации растворенного кислорода. Однако в действительности, наблюдалась обратная картина – концентрация растворенного кислорода уменьшилась с 6,4 до 4,1 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 2). Если учесть, что потребление кислорода на окисление веществ и дыхание гидробионтов в июле и августе практически одинаковое, то возможно предположить, что существует дополнительный неучтенный фактор, уменьшающий содержание растворенного кислорода в водохранилище.

Вероятнее всего, дополнительным фактором, оказывающим негативное влияние на формирование летнего минимума, является процесс

МРЦ. Во-первых, в результате фотосинтезирующей аэрации в районах массового развития водорослей образуется тонкий перенасыщенный кислородом поверхностный слой воды, который снижает абсорбцию кислорода из атмосферы на значительной части акватории водохранилища. Во-вторых, обширные поля цианобактерий, образующиеся в ясную и безветренную погоду, частично задерживают поступление солнечной радиации в нижележащие слои, что препятствует фотосинтезу и выделению кислорода в водные массы. Роль и значение дополнительного фактора в формировании кислородного режима зависит от масштаба процесса МРЦ на акватории водохранилища.

Известно, что одним из главных источников поступления кислорода в поверхностные воды является его абсорбция из атмосферы (растворение кислорода при контакте с воздухом). Абсорбция происходит на поверхности водоема. Скорость этого процесса зависит от степени насыщения воды кислородом. Чем выше степень насыщения воды кислородом, тем меньше скорость абсорбции кислорода из атмосферы. При перенасыщении поверхностного слоя воды кислородом процесс абсорбции кислорода из атмосферы практически прекращается. Перенасыщенный кислородом поверхностный слой воды, образующийся в процессе фотосинтезирующей аэрации, препятствует абсорбции кислорода из атмосферы, и мешает фотосинтезу в нижележащих слоях воды.

Водные организмы исключительно хорошо приспособились к низкому содержанию кислорода, и извлекают его из воды даже при очень низких концентрациях. Величина лимитирующей концентрации, например для любой рыбы, зависит от ее генетического строения температуры воды, уровня активности, а также испытываемого стресса. Обычно рыбы не способны существовать при концентрации менее 3 мг/л, хотя некоторые моллюски и другие организмы могут ограниченное время существовать в воде при столь низком содержании кислорода. При концентрации кислорода 3-5 мг/дм<sup>3</sup> некоторые виды рыб могут жить неограниченное время, а другие – только в течение короткого периода. При концентрации свыше 5 мг/дм<sup>3</sup> все водные организмы могут существовать неограниченное время (в пределах естественного жизненного цикла), если другие параметры окружающей среды благоприятны.

Как правило, низкие концентрации кислорода легче переносятся взрослыми особями видов, стоящих на нижней ступени эволюционной лестницы (например, крабы и устрицы). Молодь почти всех видов менее устойчива к низким концентрациям, чем взрослые. Однако делать широкое обобщение относительно влияния ге-

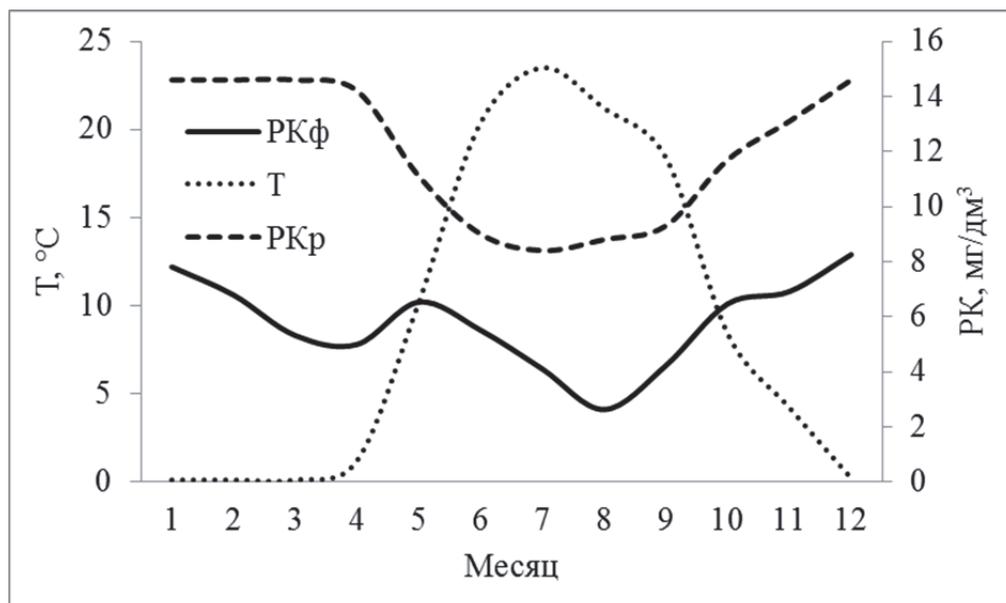


Рис. 2. Изменение  $t$ ,  $PK_{\phi}$ ,  $PK_{\rho}$  в аномальном 2010 году

нетического строения и возраста на толерантность к низким концентрациям кислорода трудно из-за значительного разнообразия видов и существующих между ними различий. Потребности в кислороде многих распространенных водных организмов в настоящее время еще неизвестны.

Огромное влияние на потребности в кислороде всех водных организмов оказывает температура воды, так как температура их тела равна температуре водной среды. Существует, однако, группа водных организмов, собственная температура которых на несколько градусов выше окружающей водной среды. Многие быстро плавающие рыбы, которые постоянно находятся в движении, обладают этой способностью. При понижении температуры воды происходит соответствующее снижение температуры тела. Метаболическая активность, в сущности, представляет собой цепь ферментативных реакций. При понижении температуры скорость этих реакций уменьшается. Таким образом, интенсивность обмена веществ и активность рыб уменьшаются с понижением температуры, при этом соответственно уменьшается и их потребность в кислороде.

Низкие концентрации РК в летний период оказывают негативное влияние на экологическое состояние водохранилища и жизнеспособность гидробионтов. При недостатке растворенного кислорода велика вероятность кислородного голодания (аноксия) водных организмов. От содержания кислорода в воде, а также скорости его поступления в организм при дыхании гидробионтов зависит интенсивность обменных процессов. Скорость потребления кислорода непосредственно зависит от его концентрации в воде. Если концентрация столь низ-

ка, что организм не может извлечь достаточного для удовлетворения основных метаболических потребностей количества кислорода, наступает гибель. В некотором диапазоне концентраций выше той, при которой уже удовлетворяются основные метаболические потребности, организм может выжить, но не проявлять достаточной активности. При этом он более уязвим для хищников, подвержен заболеваниям и влиянию различных негативных факторов. Поскольку в этой области концентраций рыба находится в стрессовом состоянии, потребности в кислороде возрастают, что еще больше осложняет ее существование. Организмы, способные совершать значительные перемещения, стремятся по возможности избегать районов, где концентрация кислорода ограничивает их активность. Обычно при недостатке кислорода в поведении рыбы появляется пассивность, она поднимается к поверхности, чтобы глотнуть воздуха.

Выше той концентрации, при которой активность организма ограничена, расположена область концентраций, обеспечивающих полную, неограниченную активность. Нижней границей этой области является критический уровень, а верхней — концентрация равновесного насыщения. Для водных организмов необходимо поддерживать концентрацию кислорода в этом диапазоне. При перенасыщении воды кислородом существует значительный риск развития так называемой газопузырьковой болезни. Она вызывается перенасыщением крови рыб и моллюсков газом, который затем выделяется в виде пузырьков в тканях гидробионтов. Накопление большого количества этих пузырьков может привести к гибели.

Необходимо отметить, что критический и летальный уровни для различных биологиче-

ских видов могут смещаться как влево, так и вправо. Верхняя граница — уровень равновесного насыщения — определяется исключительно физическими факторами, в основном температурой воды. С увеличением температуры воды скорость роста водных организмов возрастает до определенного предела. Температура, обеспечивающая максимальную скорость роста, различна для разных видов. С увеличением температуры у всех водных организмов потребление кислорода возрастает. Следовательно, повышается и критический уровень концентрации кислорода. В то же время увеличение температуры приводит к уменьшению концентрации равновесного насыщения. В результате диапазон концентрации кислорода, при котором возможна полная активность, сужается.

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

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги исследования межгодовой и сезонной изменчивости растворенного кислорода и причин, вызывающих летний дефицит РК, можно сделать следующие выводы:

1. За многолетний период наблюдений среднегодовая концентрации РК в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища менялись незначительно: средняя концентрация составила  $9,5 \pm 0,3$  мгО/дм<sup>3</sup>, наибольшая –  $10,3 \pm 0,3$  мг/дм<sup>3</sup>, наименьшая –  $9,0 \pm 0,3$  мг/дм<sup>3</sup>.

2. За 20 лет наблюдений размах средних месячных колебаний кислорода составил от  $4,1 \pm 0,2$  до  $14,2 \pm 0,5$  мг/дм<sup>3</sup>. Содержание растворенного кислорода характеризовалось ярко выраженной сезонной изменчивостью. Сезонная изменчивость включает четыре периода (А, В, С и D), которые отличаются разной направленностью процессов формирования кислородного режима в водной массе водохранилища. В периодах А и С концентрация растворенного кислорода увеличивается, а в периодах В и D - уменьшается.

3. Минимальные концентрации растворенного кислорода наблюдались в июле-августе во время процесса МРЦ. В жаркие маловодные годы концентрация кислорода уменьшалась до

критических значений и составила менее 5,0 мг/дм<sup>3</sup>, что не соответствует нормативным требованиям.

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

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуглинский, В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеоиздат. – 1992. – 223 с.
2. Алевин, О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат. – 1970. – 443 с.
3. Баранов, И.В. Термический и гидрохимический режим Волги и Куйбышевского водохранилища в 1955-1957 гг. // Труды Татарского отделения Всесоюзного научно-исследовательского озерного и речного рыбного хозяйства. – 1958. – Вып. 8. – С. 32-68.
4. Бреховских, В. Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. – М.: Наука. – 1988. – 168 с.
5. Быковский, В. И. Характеристики движения воды и разноможение водорослей // Гидробиологический журнал. – 1984. – Т. 20. – № 4. – С. 39-44.
6. Волга и ее жизнь / Отв. ред. Ф.Д. Морудхай-Болтовский. – Л.: Наука. – 1978. – 350 с.
7. Гусева, К. А. Цветение воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним // Труды Всесоюзного гидробиологического общества. – 1952. – Т. 4. – С. 3-92.
8. Гусева, Н. Н. Газовый режим Куйбышевского водохранилища в подледный период 1957-1958 и 1958-1959 гг. // Бюллетень Института биологии водохранилищ. – 1961. – № 1. – С. 53-56.
9. Даценко, Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС. – 2007. – 252 с.
10. Дебольский, В.К. Современная гидрохимическая характеристика реки Волга и ее водохранилищ / В. К. Дебольский, И. Л. Григорьева, А. Б. Комиссаров, Я. П. Корчагина, Л. И. Хрусталева, Е.А. Чекмарева // Вода: химия и экология. – 2010. – № 11. – С. 2-12.
11. Зенин, А. А. Гидрохимия Волги и её водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат. – 1965. – 260 с.
12. Кременецкая, Е. Р. Оценка скорости потребления кислорода в толще воды Можайского и Ивановков-

- ского водохранилищ // Водные ресурсы. – 2007. – Т. 34. – № 3. – С. 310-317.
13. Куйбышевское водохранилище / Отв. ред. А. В. Монаков. Л.: Наука. – 1983. – 214 с.
  14. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник) / Отв. ред. Г. С. Розенберг, Л. А. Выхристюк. Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН. – 2008. – 123 с.
  15. Лазарева, В.И. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона зообентоса / В. И. Лазарева, И. Э. Степанова, А. И. Цветков, Е. Г. Пряничникова, С. Н. Перова // Труды ИБВВ РАН. – 2018. – Вып. 81(84). – С. 47-84. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0005.
  16. Литвинов, А.С. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении / А. С. Литвинов, А. В. Законнова // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 9. – С. 91-96.
  17. Селезнева, А.В. Массовое развитие водорослей на водохранилищах р. Волги в условиях маловодья / А. В. Селезнева, В. А. Селезнев, К. В. Беспалова // Поволжский экологический журнал. – 2014. – № 1. – С. 88-96.
  18. Сиренко, Л. А. «Цветение» воды и эвтрофирование / Л. А. Сиренко, М. Я. Гавриленко. – Киев: Наукова думка. – 1978. – 232 с.
  19. Эдельштейн, К. К. Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС. – 1998. – 277 с.
  20. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища / Под ред. В.А. Знаменского, В. М. Гейтенко. Л.: Гидрометеоиздат. – 1978. – 269 с.
  21. Селезнев, В. А. Содержание хлоридных ионов в воде реки Волга / В. А. Селезнев, А. В. Селезнева // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География, Геоэкология. – 2021. – № 4. – С. 34-41. DOI: 10.17308/geo.2021.4/3748.
  22. Seleznev, V. A., Беспалова К. В., 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. Т. 40. № 5. P. 307-311.
  23. Петряхина, Е.В. Влияние недельного режима регулирования водного стока Волги на массовое развитие фитопланктона / Е. В. Петряхина, В. А. Селезнев // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2016. – Т. 25. – № 1. – С. 170-175.
  24. Герасимова, Н.А. Фитопланктон Саратовского и Волгоградского водохранилищ. Тольятти. – 1996. – 200 с.
  25. Никитин, О.В. Мониторинг цианобактериальных токсинов в водных объектах Республики Татарстан (2011-2016 гг.) / О. В. Никитин, В. З. Латыпова, Н. Ю. Степанова // Материалы международной научно-практической конференции «Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водных объектов: проблемы и пути решения». Казань: типография «ОТ Принт». – 2017. – С. 51-62.
  26. Селезнева, А.В. Формирование качества воды волжских водохранилищ при аномальных погодных условиях / А. В. Селезнева, К. В. Беспалова, В. А. Селезнев // Водное хозяйство России: проблемы, технологии управление. – 2013. – № 5. – С. 4-14.
  27. Селезнева, А. В. Оценка сезонной изменчивости качества воды в поверхностном источнике питьевого водоснабжения / А. В. Селезнева, К. В. Беспалова, В. А. Селезнев // Градостроительство и архитектура. – 2018. – Т. 8. – № 2(31). – С. 20-26.

## FORMATION OF SUMMER DEFICIENCY OF DISSOLVED OXYGEN IN THE WATER OF THE KUIBYSHEV RESERVOIR

© 2024 K.V. Selezneva, V. A. Seleznev

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

The content of dissolved oxygen is the most important indicator of the ecological state and quality of water in the Kuibyshev Reservoir, used for drinking water supply, fisheries and recreation. There is an opinion that the formation of the oxygen regime is significantly influenced by the process of mass development of cyanobacteria. Therefore, a quantitative assessment of the seasonal variability of dissolved oxygen and its deficiency under conditions of massive development of cyanobacteria is very relevant. Systematic observations were carried out at the outlet section of the Kuibyshev reservoir. The research results show that seasonal variability in the concentration of dissolved oxygen includes four periods, distinguished by different directions of the processes of formation of the oxygen regime. Within a year, two minimum levels of dissolved oxygen are observed: winter and summer. During the summer minimum, a deficiency of dissolved oxygen occurs when its concentration decreases to critical values and amounts to 4-5 mg/dm<sup>3</sup>. The formation of the summer oxygen minimum is significantly influenced by: an increase in water temperature and the process of mass development of cyanobacteria. As a result of photosynthetic aeration, a thin surface layer of water supersaturated with oxygen is formed, which disrupts the process of oxygen absorption from the atmosphere. In conditions of increasing nutrient load and global warming, the intensity and scale of the process of mass development of cyanobacteria in the Kuibyshev Reservoir will only increase, which will lead to a further increase in oxygen deficiency, deterioration of water quality and the emergence of risks for water use and fisheries.

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

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-5-132-141

EDN: XECXNG

## REFERENCES

1. *Vuglinsky V. S.* Water resources and water balance of large reservoirs of the USSR. L.: Gidrometeoizdat, 1992. 223 p.
2. *Alekin O. A.* Fundamentals of hydrochemistry. L.: Gidrometeoizdat, 1970. 443 p.
3. *Baranov I. V.* Thermal and hydrochemical regime of the Volga and the Kuibyshev reservoir in 1955-1957. // Proceedings of the Tatar branch of the All-Union Research Lake and River Fisheries. 1958. Issue. 8. P. 32–68.
4. *Brekhovskikh V.F.* Hydrophysical factors of the formation of the oxygen regime of reservoirs. M.: Nauka, 1988. 168 p.
5. *Bykovsky, V.I.*, Characteristics of water movement and algae reproduction, Hydrobiological Journal. 1984. V. 20. No. 4. S. 39–44.
6. Volga and its life / *Otv. ed. F.D. Morudkhai-Boltovsky.* L.: Science. 1978. 350 p.
7. *Guseva K. A.* Water bloom, its causes, forecast and measures to combat it // Proceedings of the All-Union Hydrobiological Society. 1952. V. 4. S. 3–92.
8. *Guseva N. N.* Gas regime of the Kuibyshev reservoir during the ice period 1957-1958 and 1958-1959. // Bulletin of the Institute of Reservoir Biology. 1961. No. 1. S. 53–56.
9. *Datsenko Yu. S.* Eutrophication of reservoirs: hydrological and hydrochemical aspects. M.: GEOS, 2007. 252 p.
10. *Debolsky V. K., Grigorieva I. L., Komissarov A. B., Korchagina Ya. P., Khrustaleva L. I., Chekmareva E. A.* Modern hydrochemical characteristics of the Volga River and its reservoirs // Water: chemistry and ecology. 2010. No. 11. P. 2–12.
11. *Zenin A. A.* Hydrochemistry of the Volga and its reservoirs. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. 260 p.
12. *Kremenetskaya, E.R.*, Estimation of the rate of oxygen consumption in the water column of the Mozhaisk and Ivankovo reservoirs, Water Resources. 2007. V. 34. No. 3. S. 310–317.
13. Kuibyshev reservoir / *Ed. ed. A. V. Monakov.* L.: Nauka, 1983. 214 p.
14. Kuibyshev reservoir (scientific and information guide) / *Ed. ed. G. S. Rozenberg, L. A. Vykhristyuk.* Togliatti: Institute of Ecology of the Volga Basin RAS, 2008. 123 p.
15. *Lazareva, V.I., Stepanova, I.E., Tsvetkov, A.I., et al.*, Oxygen regime of the Volga and Kama reservoirs during climate warming: implications for zooplankton of zoobenthos, Trudy IBVV RAN. 2018. Issue. 81(84). pp. 47–84. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0005.
16. *Litvinov A. S., Zakonnova A. V.* Thermal regime of the Rybinsk reservoir under global warming // Meteorology and Hydrology. 2012. No. 9. P. 91–96.
17. *Selezneva A. V., Seleznev V. A., Bepalova K. V.* Mass development of algae in the reservoirs of the river. Volga in conditions of low water // Povolzhsky ecological journal. 2014. No. 1. S. 88–96.
18. *Sirenko L. A., Gavrilenko M. Ya.* “Flowering” of water and eutrophication. Kyiv: Naukova Dumka, 1978. 232 p.
19. *Edelstein K.K.* Reservoirs of Russia: environmental problems, ways to solve them. M.: GEOS, 1998. 277 p.
20. Hydrometeorological Regime of Lakes and Reservoirs of the USSR: Kuibyshev and Saratov Reservoirs, *Ed. V.A. Znamensky, V.M. Geytenko.* L.: Gidrometeoizdat, 1978. 269 p.
21. *Seleznev V. A., Selezneva A. V.* The content of chloride ions in the water of the Volga River // Bulletin of the Voronezh State University. Ser. Geography, Geoecology. 2021. No. 4. P. 34–41. DOI: 10.17308/geo.2021.4/3748.
22. *Seleznev V. A., Bepalova K. V., Selezneva A. V.* Seasonal Variability of Phosphate Content in the Volga Water Under Conditions of Anthropogenic Eutrophication of Reservoirs // Journal of Water Chemistry and Technology. 2018. V. 40. No. 5. P. 307–311.
23. *Petryakhina E. V., Seleznev V. A.* Influence of the weekly regime of regulation of the Volga water flow on the mass development of phytoplankton // Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology. 2016. V. 25. No. 1. S. 170–175.
24. *Gerasimova N.A.* Phytoplankton of the Saratov and Volgograd reservoirs. Tolyatti. 1996. 200 p.
25. *Nikitin O. V., Latypova, V. Z., Stepanova N. Yu.* Monitoring of cyanobacterial toxins in water bodies of the Republic of Tatarstan (2011-2016) // Proceedings of the international scientific-practical conference «Global spread of processes of anthropogenic eutrophication of water objects: problems and solutions». Kazan: printing house «OT Print». 2017, pp. 51–62.
26. *Selezneva A. V., Bepalova K. V., Seleznev V. A.* Formation of water quality in the Volga reservoirs under abnormal weather conditions // Water industry of Russia: problems, technologies, management. 2013. No. 5. P. 4–14.
27. *Selezneva A. V., Bepalova K. V., Seleznev V. A.* Estimation of seasonal variability of water quality in a surface source of drinking water supply // Urban planning and architecture. 2018. V. 8. No. 2(31). pp. 20–26.

*Ksenia Selezneva, Candidate of Chemical Sciences, Researcher at the Laboratory for Monitoring Water Bodies of the Institute of Economics and Economics of the Russian Academy of Sciences of the Russian Academy of Sciences - a Branch of the Sam Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Methodological Work of the Institute of Chemistry and Energy of Togliatti State University.*

*E-mail: kvbepalova@yandex.ru*

*Vladimir Seleznev, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Geographical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory for Monitoring Water Bodies of the Institute of Economics and Water Resources of the Russian Academy of Sciences - a Branch of the Sam Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. E-mail: seleznev53@mail.ru*