

УДК 57.044

## Сезонная изменчивость сульфатных ионов в воде реки Волга

В. А. Селезнев

*Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Самара, Россия;  
e-mail: seleznev53@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0321-7614>*

*Информация о статье* Реферат

Поступила  
в редакцию  
06.04.2021;

получена  
после доработки  
25.04.2021

*Ключевые слова:*

река Волга,  
сульфатные ионы,  
концентрация,  
сезонная изменчивость,  
влияние водности

В воде р. Волга сульфатные ионы занимают второе место среди главных анионов по вкладу в минерализацию воды. Для изучения сезонной изменчивости концентрации сульфатов проведен анализ многолетних данных гидрологических и гидрохимических наблюдений, полученных на р. Волга в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища. За период 2001–2018 гг. средний годовой расход воды в створе наблюдений изменялся в пределах 6,2–9,0 тыс. м<sup>3</sup>/с, средняя годовая концентрация сульфатов составила 55 мг/дм<sup>3</sup>, наибольшая – 64 мг/дм<sup>3</sup>, наименьшая – 45 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание сульфатов в Куйбышевском водохранилище формируется главным образом под влиянием волжской воды, поступающей из Чебоксарского водохранилища, и камской воды, поступающей из Нижнекамского водохранилища. Концентрация сульфатов характеризовалась существенной сезонной изменчивостью. В период зимней межени наблюдались наибольшие концентрации сульфатов с максимумом в апреле, перед началом весеннего половодья (67 мг/дм<sup>3</sup>). Во время половодья содержание сульфатов уменьшалось, достигая наименьших значений в период летней межени в августе (44 мг/дм<sup>3</sup>), а затем с сентября концентрация сульфатов постепенно увеличивалась, достигая 57 мг/дм<sup>3</sup> в начале зимней межени. За многолетний период наблюдений амплитуда колебаний сульфатов составила 34–87 мг/дм<sup>3</sup>, а ее величина зависела от водности конкретного года. В маловодные годы концентрация сульфатов в воде увеличивалась, в многоводные годы – уменьшалась. В сезонном разрезе основные различия в концентрациях сульфатов в маловодные и многоводные годы приходились на период весеннего половодья и зимней межени, а в период летне-осенней межени различия становились минимальными.

*Для цитирования*

Селезнев В. А. Сезонная изменчивость сульфатных ионов в воде реки Волга. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 2. С. 202–213. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-202-213>.

## Seasonal variability of sulfate ions in the Volga River water

Vladimir A. Seleznev

*Institute of Ecology of the Volga Basin RAS, Samara, Russia;  
e-mail: seleznev53@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0321-7614>*

*Article info*

Received  
06.04.2021;

received  
in revised form  
25.04.2021

*Key words:*

Volga River,  
sulfate ions,  
content,  
seasonal variability,  
influence of water  
content

*Abstract*

In the Volga River water, sulfate ions rank second among the main anions in terms of their contribution to water mineralization. To study the seasonal variability of sulfate concentration, an analysis of long-term data of hydrological and hydrochemical observations obtained on the River Volga (in the outlet section of the Kuibyshev reservoir) has been carried out. For the period of 2001–2018 the average annual water consumption in the dam section varied in the range of 6.2–9.0 thousand m<sup>3</sup>/s, the average annual concentration of sulfates was 55 mg/dm<sup>3</sup>, the highest – 64 mg/dm<sup>3</sup>, and the lowest – 45 mg/dm<sup>3</sup>. The content of sulfates in the reservoir is formed mainly under the influence of the Volga River water coming from the Cheboksary reservoir and the Kama River water coming from the Nizhnekamsk reservoir. The sulfate content is characterized by significant seasonal variability. During the winter low-water period, the highest concentrations of sulfates were observed with a maximum in April, before the beginning of the spring flood (67 mg/dm<sup>3</sup>). During the flood, the content of sulfates decreased, reaching the lowest values during the summer low-water period in August (44 mg/dm<sup>3</sup>), and then, from September, the concentration of sulfates gradually increased, reaching 57 mg/dm<sup>3</sup> at the beginning of the winter low-water period. Over a long-term observation period, the amplitude of sulfate fluctuations was 34–87 mg/dm<sup>3</sup>, and its value depended on the water content of a particular year. In dry years, the concentration of sulfates in the water increased, and in dry years, it decreased. In the seasonal context, the main differences in sulfate concentrations in dry and high-water years occurred during the spring flood and winter low-water period, and during the summer – autumn low-water period, the differences became minimal.

*For citation*

Seleznev, V. A. 2021. Seasonal variability of sulfate ions in the Volga River water. *Vestnik of MSTU*, 24(2), pp. 202–213. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-202-213>.

## Введение

В реках и водохранилищах сульфаты распространены повсеместно, а их содержание изменяется в пределах 5–80 мг/дм<sup>3</sup> в зависимости от природно-климатических условий<sup>1</sup>. Сульфаты поступают в водные объекты в основном за счет процессов изменения и разрушения минералов и горных пород на водосборной территории под воздействием физических, химических и биологических факторов. Часть сульфатов поступает в водные объекты с подземным стоком, а также при разложении веществ растительного и животного происхождения. Значительное количество сульфатов сбрасывается в водные объекты со сточными водами от точечных и диффузных источников загрязнения. Ионная форма сульфатов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) свойственна природным водам с малой минерализацией. Содержание SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в воде лимитируется присутствием ионов кальция и магния, с которыми образуются слаборастворимые соли (CaSO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>) (Зенин и др., 1988).

Содержание сульфатов в воде имеет важное экологическое значение. Растения и другие автотрофные организмы извлекают растворенные в воде сульфаты для построения белкового вещества. После отмирания живых клеток гетеротрофные бактерии освобождают серу протеинов в виде сероводорода, легко окисляемого до сульфатов в присутствии кислорода (Никаноров, 2001).

Сульфаты активно участвуют в сложном круговороте серы в водных объектах. Содержание сульфатов влияет на органолептические свойства воды и оказывает физиологическое воздействие на состояние водных биологических ресурсов и организм человека. Предельно допустимая концентрация (ПДК) для водных объектов рыбохозяйственного назначения составляет 100 мг/дм<sup>3</sup>, для хозяйственно-питьевого водоснабжения – 500 мг/дм<sup>3</sup>.

На водохранилищах Волжско-Камского каскада сульфаты занимают второе место среди главных ионов по вкладу в минерализацию воды (Беспалова, 2019). После создания Куйбышевского водохранилища средняя годовая концентрация сульфатов в период 1958–1961 гг. составляла 40,0–58,9 мг/дм<sup>3</sup> при водности 229–282 км<sup>3</sup> (Зенин, 1965). В более поздний период (2002–2003 гг.) в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища концентрация сульфатов составляла 61,9–64,7 мг/дм<sup>3</sup> (Селезнева, 2007).

Основное внимание при изучении содержания сульфатов в волжской воде уделялось оценке пространственной неоднородности по длине Куйбышевского водохранилища (Зенин, 1965; Алекин, 1970). Закономерности сезонной изменчивости сульфатов оценивались фрагментарно с упором на период летней межени (Куйбышевское водохранилище, 2008). Однако на Куйбышевском водохранилище имеется опыт изучения сезонной изменчивости фосфатных ионов по данным круглогодичных наблюдений (Селезнева, 2007; Seleznev et al., 2018; Беспалова и др., 2018).

Гидрохимический режим водных объектов меняется повсеместно (Овчинников и др., 2012) под влиянием роста антропогенной нагрузки и глобального потепления климата (Беспалова и др., 2017). Цель исследования – дать количественную оценку сезонной изменчивости сульфатов на основе данных систематических многолетних наблюдений, полученных на р. Волга в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища, где осуществляется сезонное регулирование водного стока Жигулевским гидроузлом.

## Материалы и методы

Куйбышевское водохранилище является самым крупным в Волжско-Камском каскаде (Куйбышевское водохранилище, 2008). Оно образовано в 1957 г. водоподпорными сооружениями Жигулевского гидроузла. В состав гидроузла входят: гидроэлектростанция, совмещенная с донными водосбросами; бетонная водосливная плотина; двухступенчатый шлюз. Входными створами Куйбышевского водохранилища по волжской ветке является створ Чебоксарского водохранилища, а по камской ветке – створ Нижнекамского водохранилища (рис. 1).

В настоящее время основной задачей Куйбышевского водохранилища является комплексное использование водных ресурсов для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, энергетики, водного транспорта, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения, рыбного хозяйства. Водохранилище также используется в рекреационных целях.

Длина водохранилища по волжскому направлению составляет 510 км, максимальная ширина – 40 км, максимальная глубина – 40,0 м. Общий объем водохранилища составляет 57,3 км<sup>3</sup>, а полезный – 30,7 км<sup>3</sup>. Средний многолетний водный сток составляет 244 км<sup>3</sup>, максимальный – 366 км<sup>3</sup>, минимальный – 148 км<sup>3</sup>. Внутригодовое распределение стока следующее: весеннее половодье (апрель – июнь) – 62 %, летне-осенняя межень (июль – ноябрь) – 26 %, зимняя межень (декабрь – март) – 12 %<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2016 год / отв. ред. Г. М. Черногаева. М. : Росгидромет, 2017. URL: [http://www.meteorf.ru/upload/iblock/0f6/review2016m\\_27092017.pdf](http://www.meteorf.ru/upload/iblock/0f6/review2016m_27092017.pdf) ; Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2019. Ростов-на-Дону, 2020. 577 с.

<sup>2</sup> Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ. Куйбышевское и Саратовское водохранилища. Л. : Гидрометеоздат, 1978. 270 с.

Полезный объем позволяет осуществлять сезонное, недельное и суточное регулирование водного стока в интересах различных водопользователей. Для многолетнего регулирования водного стока емкость Куйбышевского водохранилища недостаточна. Сезонное регулирование водного стока осуществляет эксплуатирующая организация – филиал ПАО "РусГидро" – "Жигулевская ГЭС" в соответствии с "Основными правилами использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища на р. Волге", утвержденными приказом Министерства мелиорации и водного хозяйства РСФСР от 11 ноября 1983 г. № 596.

Гидрохимические наблюдения проводились ежемесячно в период 2001–2018 гг. на р. Волга в районе Жигулевского гидроузла (Селезнева и др., 2018; Беспалова, 2019), через который проходит практически весь водный сток р. Волга (рис. 1). Выше по течению от гидроузла расположено Куйбышевское водохранилище, а ниже – Саратовское. Непосредственно пункт наблюдений расположен на левом берегу Саратовского водохранилища в 2,5 км ниже по течению от Жигулевского гидроузла. Ширина водохранилища в пункте наблюдения составляет 1,0 км, а глубина – 6 м. Отбор проб воды осуществлялся батометром Молчанова ГР–18 с поверхностного горизонта с причальной бетонной стенки в соответствии с нормативными требованиями<sup>3</sup>. Пробы воды фильтровали через мембранный фильтр 0,45 мкм, промытый дистиллированной водой. При фильтрации первые порции фильтрата отбрасывались. Фильтрованная вода переливалась в полиэтиленовые бутылки с притертыми пробками. Перед отбором пробы бутылки дважды ополаскивались водой, подлежащей анализу, и заполнялись ею доверху.

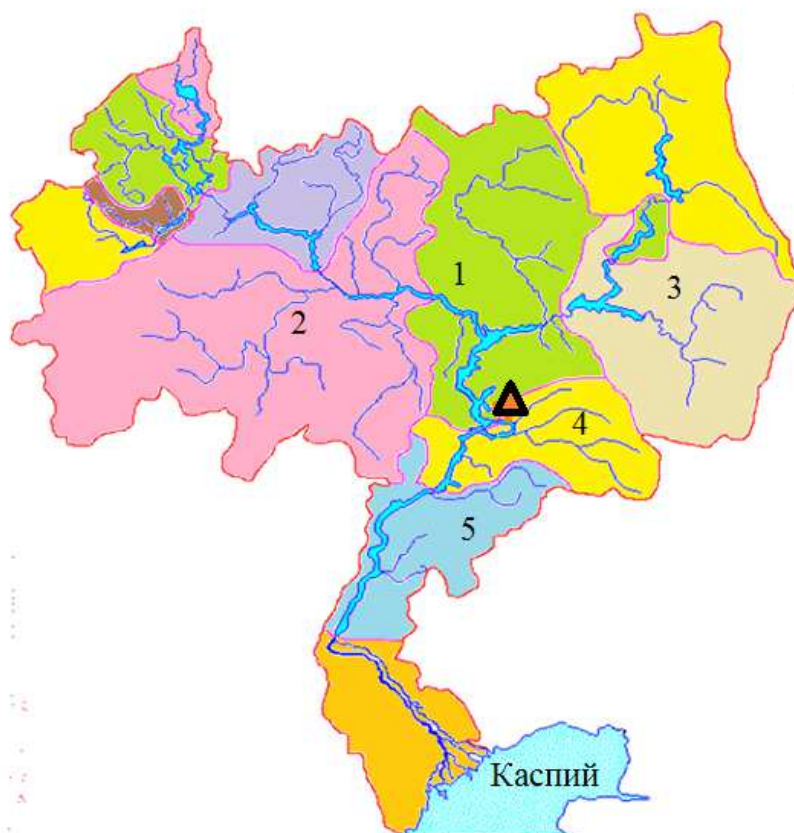


Рис. 1. Расположение пункта наблюдений (Δ) на водосборной территории р. Волга. Бассейны водохранилищ: Куйбышевского (1), Чебоксарского (2), Нижнекамского (3), Саратовского (4), Волгоградского (5)

Fig. 1. Location of the observation point (Δ) in the catchment area of the Volga River. Reservoir basins: Kuibyshevsky (1), Cheboksary (2), Nizhnekamsky (3), Saratov (4), Volgogradsky (5)

Пробы воды в течение часа автотранспортом доставлялись в лабораторию мониторинга водных объектов Института экологии Волжского бассейна Российской академии наук, где в продолжение рабочего дня осуществлялся анализ доставленной воды. Определение массовой концентрации сульфатных ионов ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) выполнялось турбидиметрическим методом в соответствии с руководящими документами Росгидромета<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> ГОСТ Р 51592-2000. Общие требования к отбору проб воды. М., 2000. 15 с.

<sup>4</sup> РД 52.24.405-2005. Массовая концентрация сульфатов в водах. Методика выполнения измерений турбидиметрическим методом. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.docplan.ru/> (дата обращения: 25.03.2021).

Учитывая, что концентрация сульфатов в основном превышала значение  $40,0 \text{ мг/дм}^3$ , выполнение измерений осуществлялось после соответствующего разбавления пробы дистиллированной водой. Диапазоны измеряемых концентраций веществ и показатель точности измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Диапазон и точность измерения концентрации сульфатных ионов ( $\text{SO}_4^{2-}$ )  
Table 1. The range and accuracy of measuring the concentration of sulfate ions ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Диапазон измерений массовой концентрации сульфатов ( $X$ ), $\text{мг/дм}^3$	Руководящий документ	Показатель точности (границы погрешности при вероятности $P = 0,95$ ) $\pm \Delta$ , $\text{мг/дм}^3$
От 2,0 до 5,0 включительно	РД 52.24.405–2005	0,8
Свыше 5,0 до 40,0 включительно		$0,1 + 0,12X$

Полученные данные химического анализа вносились в матрицу, где по оси абсцисс указывались месяцы, а по оси ординат – годы. Для изучения закономерностей сезонной изменчивости формировались для каждого месяца выборки, которые подвергались статистической обработке с использованием программы Statistica. Получено 12 выборок, по одной для каждого месяца. Каждая выборка включала 18 членов ряда. По выборкам оценивались средние  $(\text{SO}_4^{2-})_{\text{cp}}$ , максимальные  $(\text{SO}_4^{2-})_{\text{max}}$  и минимальные  $(\text{SO}_4^{2-})_{\text{min}}$  значения концентрации сульфатов.

Для сбора и анализа данных о расходах воды р. Волга в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища использована информация, предоставленная филиалом ПАО "РусГидро" – "Жигулевская ГЭС" о средних месячных расходах воды.

### Результаты и обсуждение

Сульфаты являются одним из главных анионов и поступают в водные объекты главным образом за счет процессов химического выветривания и растворения серосодержащих минералов, в основном гипса, а также окисления сульфидов и серы. Иногда на водохранилищах в застойных участках и в донных отложениях наблюдается процесс восстановления сульфатов до сероводорода под воздействием сульфатредуцирующих бактерий в отсутствие кислорода и в присутствии органических веществ (Алекин, 1970; Никаноров, 2001; 2015; Орлов, 2002; Логинова, 2011).

Особенность гидрохимического режима р. Волга состоит в том, что это крупная река, которая протекает с севера на юг на расстояние более 3,5 тыс. км и пересекает несколько географических зон. Поэтому химический состав вод р. Волга не соответствует химическому составу вод боковых притоков. В настоящее время р. Волга представляет собой Волжско-Камский каскад водохранилищ. Это сложная природно-техническая водная система, где регулирование водного стока оказывает влияние на формирование гидрохимического режима водохранилищ. При этом основным регулятором водного стока р. Волга является Куйбышевское водохранилище.

Концентрация сульфатов в воде Куйбышевского водохранилища формируется главным образом под влиянием волжской воды, поступающей из Чебоксарского водохранилища, и камской воды, поступающей из Нижнекамского водохранилища. Влияние боковых притоков (реки Свияга, Вятка, Черемшан), расположенных на местной водосборной территории Куйбышевского водохранилища, на содержание в воде сульфатов незначительно, так как объемы поступающей от них воды не большие. Межгодовые и сезонные изменения концентрации сульфатов зависят от расходов воды.

За многолетний период с 2001 по 2018 гг. средний годовой расход воды ( $Q_{\text{cp}}$ ) в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища (Жигулевский гидроузел) составил 7,7 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ . Наибольший годовой расход ( $Q_{\text{max}}$ ) составил 9,0 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$  и наблюдался в многоводном 2005 г., а наименьший ( $Q_{\text{min}}$ ) – 6,2 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$  и наблюдался в маловодном 2011 г.

Внутри года средние месячные расходы воды характеризовались сезонной изменчивостью (рис. 2), свойственной водохранилищам как природно-техническим водным объектам. По сравнению с естественным режимом р. Волга сезонное регулирование водного стока на Куйбышевском водохранилище уменьшает пиковые расходы воды и увеличивает период весеннего половодья, а в период зимней и летне-осенней межени увеличивает расходы воды (Селезнева, 2007).

Для анализа водности принято выделять три гидрологических сезона: зимнюю межень (декабрь – март), весеннее половодье (апрель – июнь) и летне-осеннюю межень (июль – ноябрь). Самый короткий – это период весеннего половодья, когда наблюдалась наибольшая амплитуда колебаний расходов воды (8,7–18,3 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ ). В начале периода весеннего половодья – в апреле – наблюдалось увеличение расходов воды, в мае наблюдался пик половодья, а в июне – спад весеннего половодья и уменьшение расходов воды до минимальных значений в период весеннего половодья. Устойчивые расходы воды наблюдались в период зимней межени и составили

5,9–6,3 тыс. м<sup>3</sup>/с. Период летне-осенней межени – самый продолжительный, когда расходы воды устойчивы (5,3–6,5 тыс. м<sup>3</sup>/с) и мало чем отличаются от расходов в период зимней межени.

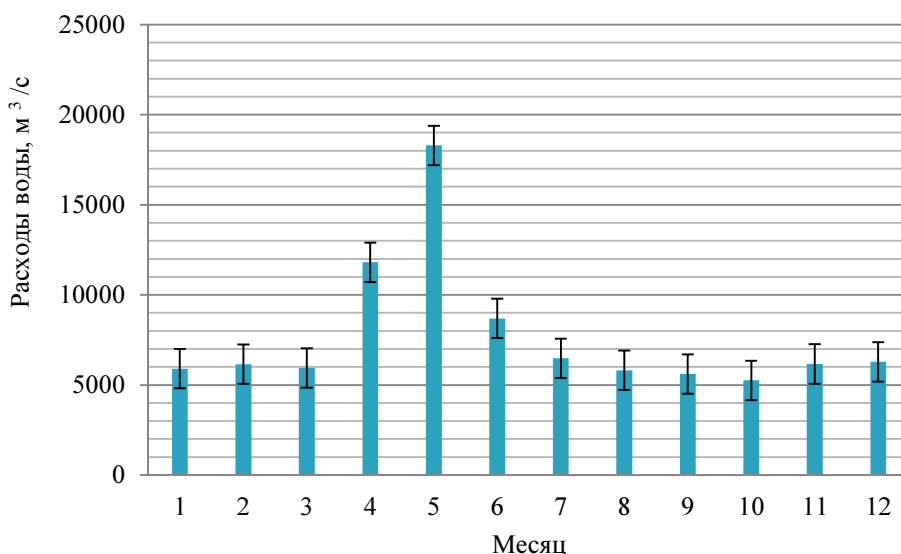


Рис. 2. Сезонная изменчивость расходов воды в створе Жигулевского гидроузла  
( $\bar{x}$ ,  $\pm$  – вертикальные планки погрешностей со стандартными ошибками)

Fig. 2. Seasonal variability of water discharge in the section of the Zhigulevsky hydroelectric complex  
( $\bar{x}$ ,  $\pm$  – vertical error bars with standard errors)

Границы и продолжительность гидрологических сезонов для каждого конкретного года зависели от погодных условий, особенно это касается периода весеннего половодья. Так, сезон весеннего половодья в 2002 г. наблюдался с 16 апреля по 21 июня и составил 66 суток, в 2003 г. продолжался с 19 апреля по 16 июня и составил 58 суток. Сезон летне-осенней межени в 2002 г. проходил с 22 июня по 25 ноября и составил 157 суток, а в 2003 г. – с 17 июня по 8 декабря и увеличился до 175 суток. Сезон зимней межени в 2001–2002 гг. проходил с 28 ноября по 15 апреля и составил 138 суток, а в 2002–2003 гг. – с 26 ноября по 18 апреля и не превысил 113 суток.

Более детальное представление о внутригодовой изменчивости расходов воды дают средние ( $q_{\text{ср}}$ ), наибольшие ( $q_{\text{max}}$ ) и наименьшие ( $q_{\text{min}}$ ) месячные расходы воды (табл. 2). За период 2001–2018 гг. установлено, что средние месячные расходы воды колебались в пределах от 5,3 до 18,3 тыс. м<sup>3</sup>/с, т. е. расходы воды меняются в 3,5 раза.

Таблица 2. Статистические характеристики средних месячных расходов воды, тыс. м<sup>3</sup>/с  
Table 2. Statistical characteristics of average monthly water flow rates, thousand m<sup>3</sup>/s

Расход воды	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$q_{\text{ср}}$	5,9	6,2	5,9	11,8	18,3	8,7	6,5	5,8	5,6	5,3	6,2	6,3
$q_{\text{max}}$	7,4	9,0	8,7	18,6	26,1	13,8	14,1	8,1	6,6	6,5	12,4	8,8
$q_{\text{min}}$	4,5	4,9	4,2	5,1	11,1	5,0	4,8	2,1	4,4	4,2	4,1	4,5

Изменение расходов воды и содержание сульфатов в воде взаимосвязаны. Концентрация сульфатов подвержена заметным сезонным колебаниям. За период с 2001 по 2018 гг. средняя годовая концентрация сульфатов составила  $55,2 \pm 6,7$  мг/дм<sup>3</sup>. Наибольшая годовая концентрация имела значение  $64,8 \pm 7,8$  мг/дм<sup>3</sup>, а наименьшая –  $44,9 \pm 5,5$  мг/дм<sup>3</sup>. Важнейшим фактором, определяющим режим сульфатов, является меняющееся соотношение между поверхностным и подземным стоком. Определенное влияние на сезонные изменения концентрации сульфатов оказывали окислительно-восстановительные процессы, биологическая обстановка в водном объекте и хозяйственная деятельность человека.

Сразу после создания Куйбышевского водохранилища средняя годовая концентрация сульфатов за период 1958–1961 гг. составила 50,4 мг/дм<sup>3</sup>. Наибольшая концентрация достигала 58,9 мг/дм<sup>3</sup>, а наименьшая – 45,0 мг/дм<sup>3</sup> (Зенин, 1965). Следовательно, средняя годовая концентрация сульфатов за последние 60 лет увеличилась на 4–5 мг/дм<sup>3</sup>. Есть основания предполагать, что увеличение концентрации сульфатов произошло

за счет сброса сточных вод. Количество сульфатов в сточных водах, ежегодно поступающих в р. Волга от точечных источников загрязнения, оценивается в 0,9–1,1 млн т/год<sup>5</sup>.

По результатам статистического анализа данных наблюдений за период 2001–2018 гг. установлено, что средняя месячная концентрация сульфатов  $(\text{SO}_4^{2-})_{\text{CP}}$  колебалась в пределах от 43,9 до 67,2 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 3), т. е. концентрация менялась в 1,5 раза. Максимальные концентрации  $(\text{SO}_4^{2-})_{\text{max}}$  сульфатов изменялись в пределах 53,8–87,5 мг/дм<sup>3</sup>, минимальные  $(\text{SO}_4^{2-})_{\text{min}}$  – в пределах 33,9–54,8 мг/дм<sup>3</sup>.

Таблица 3. Сезонные изменения концентрации сульфатов, мг/дм<sup>3</sup>  
 Table 3. Seasonal changes in sulfate concentration, mg/dm<sup>3</sup>

Сульфаты	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$(\text{SO}_4^{2-})_{\text{CP}}$	59,4	60,7	66,2	67,2	58,0	47,7	45,8	43,9	46,2	53,7	55,6	57,2
$(\text{SO}_4^{2-})_{\text{max}}$	82,0	82,7	87,5	82,8	80,8	63,1	53,8	58,6	59,5	69,5	78,3	75,1
$(\text{SO}_4^{2-})_{\text{min}}$	41,1	47,0	54,8	46,2	38,9	33,9	37,5	34,6	39,8	34,1	41,3	43,2

Сезонная изменчивость концентрации сульфатов имела ярко выраженный волновой характер (рис. 3). Ложбина волны приходилась на летний период с минимальной концентрацией в августе. Гребень волны наблюдался в период зимней межени с максимальной концентрацией в апреле, перед началом весеннего половодья. В период весеннего половодья содержание сульфатов уменьшалось, а в начале осени вновь начинало увеличиваться.

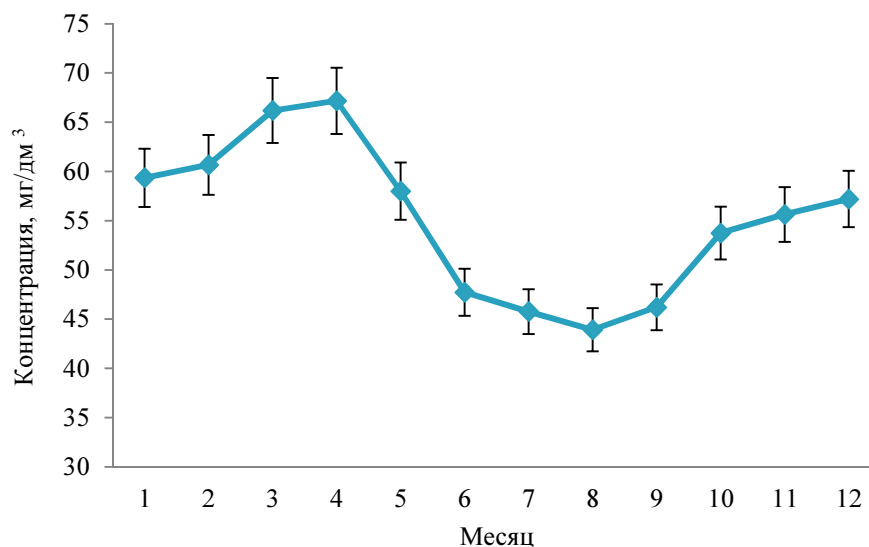


Рис. 3. Сезонная изменчивость концентрации сульфатов (T, ± – вертикальные планки погрешностей)  
 Fig. 3. Seasonal variability of sulfate concentration (T, ± – vertical error bars)

На Куйбышевском водохранилище сезонная изменчивость концентрации сульфатов отличается от сезонной изменчивости на р. Волга до зарегулирования водного стока. В речных условиях сезонные изменения концентрации сульфатов находились в противофазе с сезонными изменениями величин расходов воды. В пик весеннего половодья наблюдались минимальные концентрации сульфатов, а со спадом половодья и переходом на летне-осеннюю и зимнюю межень она возрастала (Зенин, 1965). На Куйбышевском водохранилище пик весеннего половодья наблюдался в мае, а минимальные концентрации сульфатов – в период летней межени. Постепенное увеличение концентрации сульфатов наблюдалось с сентября и продолжалось вплоть до конца зимней межени.

<sup>5</sup> Воды России (состояние, использование, охрана) 1995. Екатеринбург : РосНИИВХ, 1996. 103 с. ; Государственный доклад "О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году". М. : НИА – Природа, 2019. 290 с.

Сезонная изменчивость концентрации сульфатов в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища в основном обусловлена сменой различных водных масс, сформированных в период весеннего половодья в результате взаимодействия поверхностной и подземной составляющих водного стока. В различные сезоны года вклад поверхностных и подземных вод в формирование водного стока не одинаков. В период весеннего половодья увеличивается роль талых вод с низким содержанием сульфатов ( $1-10 \text{ мг/дм}^3$ ) в формировании водного стока, и концентрация сульфатов в волжской воде уменьшается. В меженный период роль подземного стока постепенно возрастает, и концентрация сульфатов увеличивается вплоть до начала весеннего половодья.

Амплитуда сезонных колебаний концентрации сульфатов за период 2001–2018 гг. составила 33,9–87,5  $\text{мг/дм}^3$ . В рамках конкретного года амплитуда зависела от объема весеннего половодья. Чем больше объем половодья, тем больше амплитуда сезонных колебаний концентрации сульфатов в воде.

Для оценки влияния водности на сезонную изменчивость концентрации сульфатов из многолетнего ряда наблюдений выбраны для сравнения два многоводных (2005, 2013) и два маловодных (2006, 2015) года. Величина расходов воды в многоводные и маловодные годы существенно отличалась. Сравним между собой многоводный 2005 г. и маловодный 2006 г. (табл. 4), а также многоводный 2013 г. и маловодный 2015 г.

Таблица 4. Средние месячные расходы воды для 2005 г. и 2006 г., тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$   
Table 4. Average monthly water discharge for 2005 and 2006, thousand  $\text{м}^3/\text{с}$

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2005	7,4	7,4	8,3	13,7	26,1	10,7	6,8	6,6	6,2	5,2	5,1	5,0
2006	5,0	5,2	4,5	5,1	14,4	8,7	6,0	5,3	5,4	5,0	5,7	7,4

Средний расход воды в многоводном 2005 г. составил 9,0 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ , а в маловодном 2006 г. – 6,5 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ . Таким образом, наблюдаемый в 2005 г. средний годовой расход воды в 1,4 раза больше, чем в маловодном 2006 г. Средние месячные расходы воды представлены в табл. 4. Наибольшая разница в средних месячных расходах воды в многоводный 2005 г. и маловодный 2006 г. наблюдалась в апреле и мае и составила 8,6 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$  и 11,7 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$  соответственно. В многоводном 2005 г. расход воды в апреле был в 2,7 раза, а в мае в 1,8 раза больше, чем в эти же месяцы в маловодном 2006 г.

Сезонное регулирование водного стока в многоводном 2005 г. осуществлялось в ожидании большого притока воды в период весеннего половодья (рис. 4). Для приема весенней воды необходимо было освободить от осенне-зимней воды значительную часть полезной емкости Куйбышевского водохранилища. Для этого с января по март расходы воды были увеличены и составили 7,4–8,3 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ . В апреле началось заполнение Куйбышевского водохранилища весенней водой, поступающей через створы Чебоксарского и Нижнекамского гидроузлов. Одновременно происходило увеличение расходов в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища до 13,7  $\text{м}^3/\text{с}$ . Пик половодья наблюдался в мае, когда расходы воды достигли 26,1 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ . С июля наступил период летней межени с расходами воды 6,8–5,2 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ .

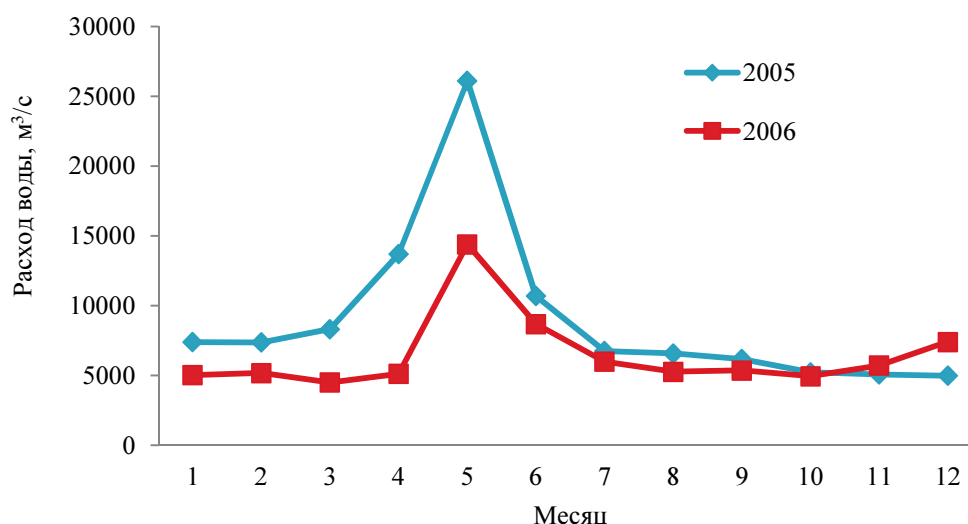


Рис. 4. Сезонные изменения расходов воды в 2005 и 2006 годах  
Fig. 4. Seasonal changes in water discharge in 2005 and 2006

Сезонное регулирование водного стока в маловодном 2006 г. осуществлялось в ожидании маленького притока воды в период весеннего половодья (рис. 4). В зимнюю межень расходы воды с января по апрель были уменьшены до 4,5–5,2 тыс. м<sup>3</sup>/с. Весеннее половодье началось с опозданием и расходы воды в мае составили всего 4,5–5,2 тыс. м<sup>3</sup>/с. В период летней межени расходы воды достигали 5,0–6,0 тыс. м<sup>3</sup>/с и мало чем отличались от подобного периода в многоводном 2005 г.

Изменение режима регулирования водного стока в многоводном 2005 г. и маловодном 2006 г. нашло свое отражение в сезонных изменениях концентрации сульфатов в эти годы (табл. 5).

Таблица 5. Сезонные изменения концентрации сульфатов в 2005 и 2006 годах, мг/дм<sup>3</sup>  
Table 5. Seasonal changes in sulfate concentration in 2005 and 2006, mg/dm<sup>3</sup>

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2005	54,7	52,0	56,0	63,3	56,3	36,6	37,5	40,0	44,6	60,4	67,6	63,2
2006	57,0	58,7	68,3	75,3	70,8	46,8	45,0	44,5	50,5	62,8	65,4	63,0

Средняя годовая концентрация сульфатов в многоводном 2005 г. составила 52,7 мг/дм<sup>3</sup>, а в маловодном 2006 г. выросла до 59,0 мг/дм<sup>3</sup>. Следовательно, средняя годовая концентрация сульфатов в многоводном 2005 г. была на 6,3 мг/дм<sup>3</sup> меньше, чем в маловодном 2006 г. В многоводном 2005 г. наибольшая концентрация наблюдалась в апреле и оценивалась в 63,3 г/дм<sup>3</sup>, а наименьшая – в июне и составила 36,6 мг/дм<sup>3</sup>. В маловодном 2006 г. наибольшая концентрация наблюдалась в апреле и достигала 75,3 мг/дм<sup>3</sup>, а наименьшая – в августе и составила 44,5 мг/дм<sup>3</sup>. Амплитуда сезонных изменений концентраций в многоводном 2005 г. составила 36,6–67,6 мг/дм<sup>3</sup>, а в маловодном 2006 г. – 44,5–54,8 мг/дм<sup>3</sup>. Наибольшая разница в концентрациях сульфатов в многоводном 2005 г. и маловодном 2006 г. наблюдалась в апреле и мае и оценивалась в 12,0 мг/дм<sup>3</sup> и 14,5 мг/дм<sup>3</sup> соответственно. Снижение водности в 2006 г. по сравнению с 2005 г. в 1,4 раза привело к увеличению концентрации сульфатов в 2006 г. на 6,3 мг/дм<sup>3</sup>. Наибольшее увеличение концентрации сульфатов составило 1,2 раза и наблюдалось в апреле (рис. 5).

Наибольшее увеличение концентрации сульфатов в маловодном 2006 г. по сравнению с многоводным 2005 г. составило 1,3 раза и наблюдалось в мае (рис. 5), когда разница в расходах воды была 14,1 и 26,1 тыс. м<sup>3</sup>/с (табл. 5).

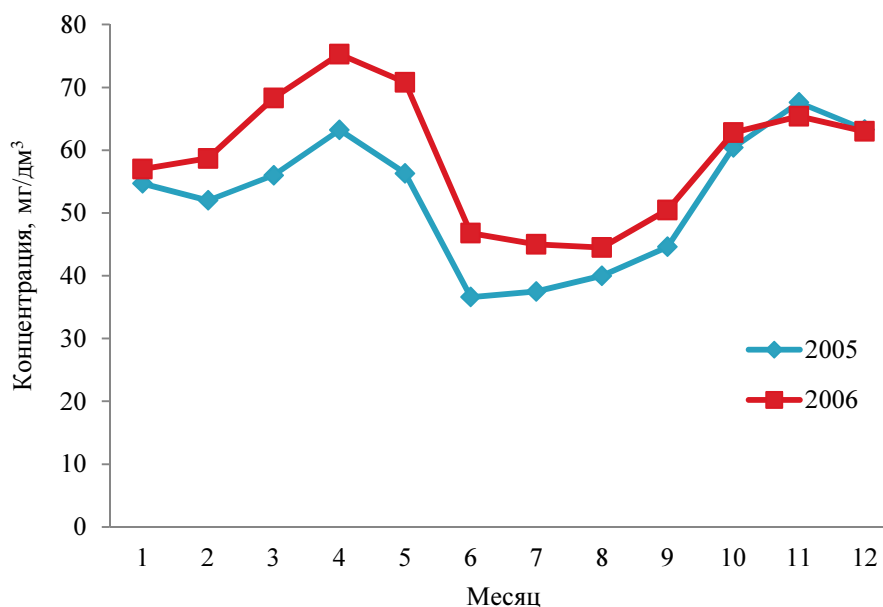


Рис. 5. Сезонные изменения расходов воды и концентрации сульфатов в 2005 и 2006 годах  
Fig. 5. Average monthly water discharges in 2005 and 2006

Похожий сценарий сезонного регулирования водного стока в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища наблюдался в многоводном 2013 г. и маловодном 2015 г. Отличие состояло в том, что период весеннего половодья в многоводный 2013 г. был более продолжительный, чем в многоводный 2005 г.

Средний расход воды в многоводном 2013 г. составил 8,5 тыс. м<sup>3</sup>/с, а в маловодном 2015 г. – 6,2 тыс. м<sup>3</sup>/с. Годовой расход воды в 2013 г. был больше в 1,4 раза, чем в 2015 г. Средние месячные расходы воды представлены в табл. 6. Наибольшая разница в расходах воды в многоводный 2013 г. и маловодный 2015 г.



наблюдалась в апреле и мае и составляла 10,9 тыс. м<sup>3</sup>/с и 6,8 тыс. м<sup>3</sup>/с соответственно. В многоводном 2013 г. расход воды в апреле был в 3,1 раза, а в мае в 1,5 раза больше, чем в эти же месяцы в маловодном 2015 г.

Таблица 6. Средние месячные расходы воды для 2013 и 2015 годов, тыс. м<sup>3</sup>/с  
Table 6. Average monthly water discharge for 2013 and 2015, thousand m<sup>3</sup>/s

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2013	6,7	6,9	7,0	16,0	20,6	10,6	5,0	5,0	5,1	6,3	6,8	6,1
2015	4,7	4,9	4,7	5,1	13,8	6,2	5,4	5,9	5,9	5,8	6,4	6,1

Сезонное регулирование водного стока в 2013 г. осуществлялось в ожидании большого притока воды в период весеннего половодья (рис. 6). Необходимо было освободить от осенне-зимней воды значительную часть полезной емкости Куйбышевского водохранилища. Для этого с января по март расходы воды были значительные и составили 6,7–7,0 тыс. м<sup>3</sup>/с. В апреле с началом весеннего половодья происходило увеличение расходов до 16,0 м<sup>3</sup>/с.

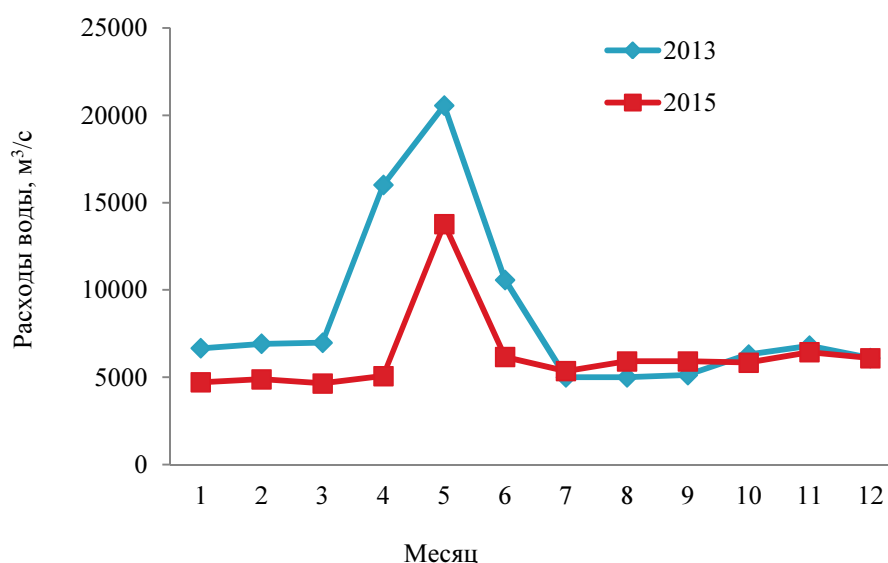


Рис. 6. Сезонные изменения расходов воды в 2013 и 2015 годах  
Fig. 6. Seasonal changes in water discharge in 2013 and 2015

Пик половодья наблюдался в мае, когда расходы воды достигли 20,6 тыс. м<sup>3</sup>/с. В июле наступил период летней межени с расходами воды, равными 5,0–5,1 тыс. м<sup>3</sup>/с.

Иначе происходило сезонное регулирование водного стока в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища в маловодном 2015 г. В ожидании маленького притока воды в период весеннего половодья средние месячные расходы воды с января по апрель были уменьшены до 4,7–4,9 тыс. м<sup>3</sup>/с. Весеннее половодье началось с опозданием, и расходы воды в мае не превышали 13,8 тыс. м<sup>3</sup>/с. В период летне-осенней межени расходы воды составили 5,4–6,4 тыс. м<sup>3</sup>/с и мало чем отличались от подобного периода в многоводном 2013 г.

Изменение режима регулирования водного стока в многоводном 2013 г. и маловодном 2015 г. нашло свое отражение в сезонной изменчивости концентрации сульфатов воды (табл. 7). Наибольшая разница в концентрациях в многоводном 2013 г. и маловодном 2015 г. наблюдалась в апреле и мае и оценивалась в 31,4 и 18,8 мг/дм<sup>3</sup> соответственно.

Таблица 7. Сезонные изменения концентрации сульфатов в 2013 и 2015 годы, мг/дм<sup>3</sup>  
Table 7. Seasonal changes in sulfate concentration in 2013 and 2015, mg/dm<sup>3</sup>

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2013	41,0	47,0	56,0	46,0	39,0	34,0	43,0	41,0	45,0	41,0	53,0	57,0
2015	64,2	63,7	69,6	77,4	57,8	44,1	42,1	38,6	46,6	45,6	49,0	56,9

Средняя годовая концентрация сульфатов в многоводном 2013 г. составила  $45,3 \text{ мг/дм}^3$ , а в маловодном 2015 г. выросла до  $54,6 \text{ мг/дм}^3$ . Следовательно, средняя годовая концентрация сульфатов в многоводном 2013 г. была на  $9,3 \text{ мг/дм}^3$  меньше, чем в маловодном 2015 г. В многоводном 2013 г. наибольшая концентрация сульфатов наблюдалась в апреле ( $56,0 \text{ мг/дм}^3$ ) и декабре ( $57,0 \text{ мг/дм}^3$ ), а наименьшая – в июне и составила  $34,0 \text{ мг/дм}^3$ . В маловодном 2015 г. наибольшая концентрация наблюдалась в апреле ( $75,3 \text{ мг/дм}^3$ ) перед началом весеннего половодья, а наименьшая – в августе и составила  $38,6 \text{ мг/дм}^3$ . Амплитуда сезонных изменений концентраций в многоводном 2013 г. составила  $34,0\text{--}57,0 \text{ мг/дм}^3$ , а в маловодном 2015 г. –  $38,6\text{--}77,4 \text{ мг/дм}^3$ .

Снижение водности в 2015 г. в 1,4 раза по сравнению с 2013 г. привело к увеличению концентрации сульфатов в 2015 г. на  $9,3 \text{ мг/дм}^3$ . Наибольшее увеличение в 2015 г. концентрации сульфатов составило 1,7 раза и наблюдалось в апреле (рис. 7), когда расходы воды увеличились с 5,1 до  $16,0 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$ .

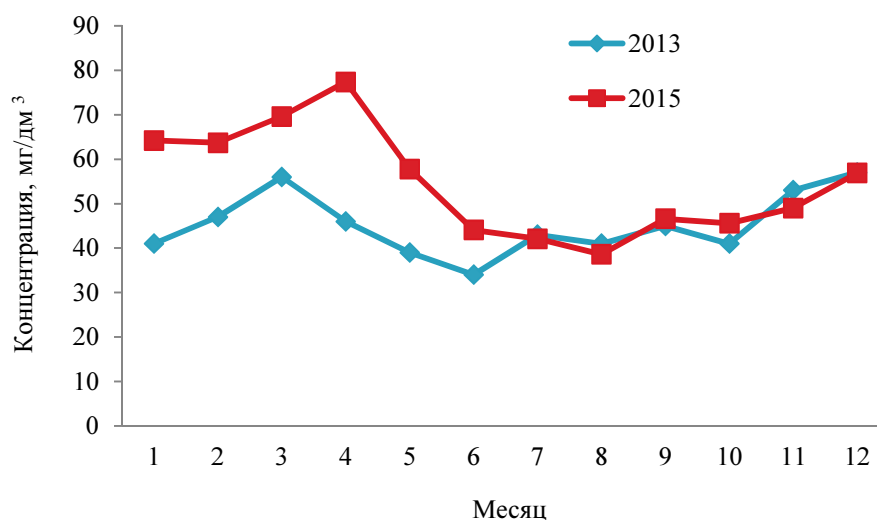


Рис. 7. Сезонные изменения концентрации сульфатов в 2013 и 2015 годах  
Fig. 7. Seasonal changes in water discharge in 2013 and 2015

Оценка влияния водности показывает, что в маловодные годы концентрация сульфатов в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища увеличивается, а в многоводные годы – уменьшается. В многоводные и маловодные годы разница в концентрации средних годовых значений сульфатов может достигать  $15 \text{ мг/дм}^3$ , а разница средних месячных значений –  $30 \text{ мг/дм}^3$ . В экстремально маловодные годы в межень период концентрация сульфатов будет приближаться к критической отметке предельно допустимой концентрации  $100 \text{ мг/дм}^3$  для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Концентрация сульфатов в воде зависит от объема воды в период весеннего половодья. В сезонном разрезе основные различия в концентрациях сульфатов в маловодные и многоводные годы приходятся на период весеннего половодья и зимней межени, а в период летне-осенней межени различия минимальные.

### Заключение

За период 2001–2018 гг. средняя годовая концентрация сульфатов в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища составила  $55,2 \text{ мг/дм}^3$ . Данная концентрация сульфатов формируется, главным образом, под влиянием волжской воды, поступающей из Чебоксарского водохранилища, и камской воды, поступающей из Нижнекамского водохранилища. Влияние боковых притоков, расположенных на водосборной территории Куйбышевского водохранилища, незначительно и оценивается в пределах 3–5 %.

Сезонная изменчивость концентрации сульфатов имела ярко выраженный волновой характер. Ложбина волны приходилась на летний период с минимальной концентрацией в августе. Гребень волны наблюдался в период зимней межени с максимальной концентрацией в апреле, перед началом весеннего половодья. В период весеннего половодья содержание сульфатов уменьшалось, а в начале осени вновь начинало увеличиваться.

Влияние водности состоит в том, что в маловодные годы концентрация сульфатов в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища увеличивается, а в многоводные годы – уменьшается. Разница в концентрации средних годовых значений сульфатов в многоводные и маловодные годы составляла  $15 \text{ мг/дм}^3$ , а для средних месячных значений –  $30 \text{ мг/дм}^3$ . В сезонном разрезе основные различия в концентрациях сульфатов в маловодные и многоводные годы приходятся на период весеннего половодья и зимней межени, а в период летне-осенней межени различия минимальные.

За последние 60 лет средняя годовая концентрация сульфатов в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища увеличилась примерно на 10 %, и это произошло при увеличении водности р. Волга. Поэтому есть основания предполагать, что увеличение концентрации сульфатов произошло за счет сброса сточных вод, так как в р. Волга и ее притоки ежегодно поступает 0,9–1,1 млн т сульфатов от точечных источников загрязнения.

#### Благодарности

Работа выполнена в лаборатории мониторинга водных объектов Института экологии Волжского бассейна Российской академии наук в рамках темы: "Экологические закономерности структурно-функциональной организации, ресурсного потенциала и устойчивого функционирования экосистем Волжского бассейна". Автор благодарит сотрудников лаборатории, которые принимали участие в отборе и химическом анализе проб воды в период с 2001 по 2018 годы.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### Библиографический список

- Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л. : Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
- Беспалова К. В. Сезонная изменчивость качества воды Саратовского водохранилища // Самарская Лука. Проблемы региональной и глобальной экологии. 2019. Т. 28, № 2. С. 258–261.
- Беспалова К. В., Селезнева А. В., Селезнев В. А. Сезонная изменчивость концентрации минерального фосфора в воде Саратовского водохранилища // Волга и ее жизнь : тез. докл. Всерос. науч. конф., Борок, 22–26 октября 2018 г. Ярославль : Филигрань, 2018. С. 8.
- Беспалова К. В., Селезнев В. А., Селезнева А. В. Качество вод волжских водохранилищ в условиях глобального потепления климата // Ресурсосбережение и экологическое развитие территорий : I Всерос. науч.-практ. конф., Тольятти, 25–27 апреля 2017 года : сб. материалов. Тольятти : ТГУ, 2017. С. 126–129.
- Зенин А. А. Гидрохимия Волги и ее водохранилищ. Л. : Гидрометеиздат, 1965. 259 с.
- Зенин А. А., Белоусова Н. В. Гидрохимический словарь. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 240 с.
- Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник) / отв. ред. Г. С. Розенберг, Л. А. Выхристюк. Тольятти : ИЭВБ РАН. 2008. 123 с.
- Логина Е. В., Лопух П. С. Гидроэкология. Минск : БГУ, 2011. 300 с.
- Никаноров А. М. Гидрохимия. СПб. : Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
- Никаноров А. М. Фундаментальные и прикладные проблемы гидрохимии и гидроэкологии. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2015. 571 с.
- Овчинникова С. И., Широкая Т. А., Пашкина О. И. Основные тенденции изменения гидрохимических показателей водной экосистемы Кольского залива (2000–2011 годы) // Вестник МГТУ. 2012. Т. 15, № 3. С. 544–550.
- Орлов Д. С., Садовникова Л. К., Лозановская И. Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М. : Высш. шк., 2002. 334 с.
- Селезнева А. В. От мониторинга к нормированию антропогенной нагрузки на водные объекты / под ред. Г. С. Розенберга. Самара : СамНЦ РАН, 2007. 105 с.
- Селезнева А. В., Беспалова К. В., Селезнев В. А. Оценка сезонной изменчивости качества воды в поверхностном источнике питьевого водоснабжения // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8, № 2(31). С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.17673/vestnik.2018.02.4>.
- Seleznev V. A., Bespalova K. V., Selezneva A. V. Seasonal variability of phosphate content in the Volga water under conditions of anthropogenic eutrophication of reservoirs // Journal of Water Chemistry and Technology. 2018. Vol. 40, Iss. 5. P. 307–311. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063455X18050107>.

#### References

- Alekin, O. A. 1970. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad. (In Russ.)
- Bespalova, K. V. 2019. Seasonal variability of water quality in the Saratov reservoir. *Samarskaya Luka: Problems of regional and global ecology*, 28(2), pp. 258–261. (In Russ.)
- Bespalova, K. V., Selezneva, A. V., Seleznev, V. A. 2018. Seasonal variability of the concentration of mineral phosphorus in the water of the Saratov reservoir. Abstract of reports *The River Volga and Its Life*, Yaroslavl', p. 8. (In Russ.)
- Bespalova, K. V., Seleznev, V. A., Selezneva, A. V. 2017. Water quality of the Volga reservoirs in the context of global climate warming. In coll. articles *Resource Saving and Ecological Development of Territories*, Samara, pp. 126–129. (In Russ.)
- Zenin, A. A. 1965. Hydrochemistry of the Volga and its reservoirs. Leningrad. (In Russ.)
- Zenin, A. A., Belousova, N. V. 1988. Hydrochemical Dictionary. Leningrad. (In Russ.)

- Kuibyshev reservoir (scientific information reference book). 2008. Ed. G. S. Rosenberg et al. Togliatti. (In Russ.)
- Loginova, E. V., Lopukh, P. S. 2011. Hydroecology. Minsk. (In Russ.)
- Nikanorov, A. M. 2001. Hydrochemistry. St. Petersburg. (In Russ.)
- Nikanorov, A. M. 2015. Fundamental and applied problems of hydrochemistry and hydroecology. Rostov-on-Don. (In Russ.)
- Ovchinnikova, S. I., Shirokaya, T. A., Pashkina, O. I. 2012. The main trends in changes in the hydrochemical parameters of the aquatic ecosystem of the Kola Bay (2000–2011). *Vestnik of MSTU*, 15(3), pp. 544–550. (In Russ.)
- Orlov, D. S., Sadovnikova, L. K., Lozanovskaya, I. N. 2002. Ecology and protection of the biosphere in case of chemical pollution. Moscow. (In Russ.)
- Selezneva, A. V. 2007. From monitoring to regulation of anthropogenic load on water bodies. Ed. G. S. Rozenberg. Samara. (In Russ.)
- Selezneva, A. V., Bespalova, K. V., Seleznev, V. A. 2018. Assessment of seasonal variability of water quality in a surface source of drinking water supply. *Urban construction and architecture*, 8(2–31), pp. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.17673/vestnik.2018.02.4>. (In Russ.)
- 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*, 40(5), pp. 307–311. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063455X18050107>.

#### Сведения об авторе

**Селезнев Владимир Анатольевич** – пер. Студенческий, 3а, г. Самара, Россия, 443001;  
Институт экологии Волжского бассейна РАН, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник;  
e-mail: [seleznev53@mail.ru](mailto:seleznev53@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0321-7614>

**Vladimir A. Seleznev** – 3a Studenchesky Lane, Samara, Russia, 443001; Institute of Ecology  
of the Volga Basin RAS, Dr Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher;  
e-mail: [seleznev53@mail.ru](mailto:seleznev53@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0321-7614>