

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИРИКЛИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

© 2022 г. Е. А. Шашуловская<sup>а</sup>, \*, С. А. Мосияш<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Саратовский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт  
рыбного хозяйства и океанографии», Саратов, Россия

\*e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.11.2021 г.

После доработки 10.07.2022 г.

Принята к публикации 17.07.2022 г.

Показаны изменения общей минерализации, содержания органического вещества и биогенных элементов в воде самого крупного на р. Урал Ириклинского водохранилища в 2010–2019 гг. на фоне современной климатической трансформации. Проведен анализ динамики приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Оренбургской области. Рост зимних температур способствовал перераспределению внутригодового водного притока к искусственному водоему. За последнее десятилетие его доля в зимний период достоверно увеличилась почти в 2 раза (с 6 до 15%), а в паводок, наоборот, наблюдалась слабая тенденция к снижению. Изменения составляющих водного баланса привели к увеличению минерализации за счет повышения содержания сульфатов, гидрокарбонатов и суммы щелочных элементов. Сокращение количества осадков в регионе в начале XXI в. явилось вероятной причиной уменьшения объема весеннего половодья и, как следствие, снижения концентраций аллохтонного органического вещества, аммонийного азота и кремния. Динамика минерального азота в большей степени зависела от водности, а доминирующим источником в генезисе фосфатов являлись, очевидно, внутриводоемные процессы. Концентрация железа определялась величиной паводкового притока. Пространственная динамика ингредиентов обусловлена морфометрическими особенностями водоема. Наиболее высокие концентрации отмечены в верховье. Снижение содержания основных гидрохимических компонентов в глубоководных нижних плесах в результате внутриводоемных процессов свидетельствует о высокой самоочищающей способности водохранилища. Полученные результаты могут пополнить уже известные данные о функционировании водных экосистем разных географических зон в современных условиях изменения климата.

*Ключевые слова:* Ириклинское водохранилище, изменение климата, водный приток, минерализация, органическое вещество, биогенные элементы

DOI: 10.31857/S2587556622050119

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших экологических проблем в последние десятилетия является глобальная трансформация климата. Наблюдаемое потепление приводит к изменению важнейшей компоненты гидрологического цикла рек и водохранилищ – водного стока, трансформация которого нарушает их водохозяйственное использование для бесперебойного обеспечения нужд экономики и населения и изменяет качество воды. Многолетняя динамика речного стока на территории РФ в XX – начале XXI вв. отличается разнонаправленностью (Научно-прикладной ..., 2021; Черенкова, Сидорова, 2021). На большей части территории РФ отмечается увеличение годового стока, наиболее значительное в северной части

бассейна Волги и верховьях Северной Двины, Урала, Иртыша, в северной и центральной частях Азиатской территории России. На юге, в бассейнах Нижней Волги, Дона и Днепра, наоборот, зафиксировано снижение годового стока и более частое наблюдение маловодных лет. Для большинства рек европейской части России (ЕЧР) со снежным типом питания отмечено внутригодовое перераспределение водного стока: сокращение доли в весенний период и увеличение в маловодные сезоны (Георгиевский, 2018; Джамалов и др., 2015; Дмитриева, Нефедова, 2018; Сивохиц и др., 2019; Черенкова, Сидорова, 2021). Основная причина данной трансформации – рост приземных температур в холодный сезон. В результате частых оттепелей водность рек ЕЧР в течение

зимнего периода возрастает, а запасы воды в снежном покрове к началу весны уменьшаются, что создает условия для снижения объема весеннего половодья. Подобная тенденция сохраняется и на крупных водохранилищах, несмотря на то, что их гидрологический режим в значительной мере определяется зарегулированием стока и изъятием воды на орошение и другие нужды (Научно-прикладной ..., 2017).

В водоемах трансформация климата способствует увеличению продолжительности явлений аноксии в гипolimнионе, перестройке циклов биогенных элементов, снижению прозрачности, изменению биоразнообразия и др. (Вишневский, 2020; Калинкина и др., 2018; Корнева и др., 2019; Лазарева и др., 2018; Линник, 2020; Структура ..., 2018; Нёок et al., 2020; Shashulovskaya et al., 2021). Несмотря на общие закономерности, в каждом конкретном водоеме присутствуют свои особенности, зависящие от климатических, гидрологических и морфометрических характеристик, а также антропогенной нагрузки.

Пространственно-временная изменчивость водного режима усугубляется в степных регионах России ввиду ограниченной обеспеченности водными ресурсами в условиях семиаридного климата. Глубоководное Ириклинское водохранилище – самый крупный искусственный водоем комплексного назначения, созданный на трансграничной р. Урал в ее верхнем течении. Интенсивное хозяйственное освоение водосборного бассейна привело к загрязнению акватории сточными водами горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, значительная часть которых вносится в водоем с основным стоком р. Урал, протекающим через Заводской пруд Магнитогорского металлургического комбината (Шашуловская, Мосияш, 2020). Ириклинское водохранилище регулирует водность среднего течения реки Урал и оказывает существенное воздействие на его самоочищающую способность (Шашуловская и др., 2017).

Исследуемое водохранилище и его водосборный бассейн входят в категорию наиболее изученных объектов Росгидромета в области гидрологии (Научно-прикладной ..., 2017). Тем не менее значительное количество разновременных гидрохимических исследований (Балабанова, 1971; Павлейчик, Сивохиц, 2013; Соловых и др., 2003; Чибилев и др., 2006) отличается фрагментарностью, что не позволило выявить достоверных количественных закономерностей в изменениях качества воды искусственного водоема.

Несмотря на определенную устойчивость экосистемы Ириклинского водохранилища (Шашуловская, Мосияш, 2019), перераспределение внутригодового стока изменяет режим базовых гидрохимических компонентов, как важнейшую

характеристику качества вод, определяющую их биологическую продуктивность.

Для понимания особенностей формирования химического состава в условиях изменения климата используют данные долговременных наблюдений на различных водных объектах и установленные зависимости между гидрохимическими и климатическими параметрами. На ЕЧР и Украине многолетние исследования проводятся на небольшом количестве водоемов, к которым можно отнести некоторые водохранилища Верхней и Нижней Волги, Днепра и др. (Жежеря и др., 2021; Моисеенко и др., 2011; Структура ..., 2018; Datsenko and Puklakov, 2020; Shashulovskaya et al., 2021).

Таким образом, цель нашей работы – анализ пространственно-временных изменений основных гидрохимических показателей Ириклинского водохранилища во втором десятилетии XXI в. на фоне климатической трансформации. Основные задачи включали фиксацию внутригодового изменения водного притока к водохранилищу, анализ динамики осадков и приземной температуры воздуха на территории Оренбургской области, а также установление характера трансформации основных ионов, биогенных элементов и органического вещества в воде водохранилища в современных условиях.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Краткая характеристика Ириклинского водохранилища.** Водоем расположен на территории Оренбургской области в бывшем Ириклинском ущелье Уральского горного сооружения и представляет собой цепь русловых озеровидных расширений со скалистыми берегами. Верхние плесы (Чапаевский и Софинский) мелководные с максимальными глубинами до 15 м. В нижних плесах (Таналык-Суундукский и Приплотинный) наибольшие глубины достигают 28–36 м (Чибилев и др., 2006). Для водохранилища характерен слабый водообмен (один раз в два года). Его длина 75 км, объем – 3.25 км<sup>3</sup>. Особенность р. Урал – маловодность бассейна и большие колебания объема стока по годам и сезонам, что определяется климатическими условиями и характером подстилающих горизонтов.

В работе использованы собственные исследования Ириклинского водохранилища в 2010–2019 гг.; литературные данные (Соловых и др., 2003; Чибилев и др., 2006) приведены для сравнения с 1975–1990 гг., когда (предположительно) изменение климата еще не сказывалось на гидрохимическом режиме. Отбор проб осуществляли на русловых (поверхностный и придонный горизонты) и прибрежных участках с учетом вегетационного сезона (в мае, июле и октябре) по стандартным



**Рис. 1.** Карта-схема Ириклинского водохранилища. Плесы: I – Чапаевский, II – Софинский, III – Таналык-Суундукский, IV – Приплотинный.

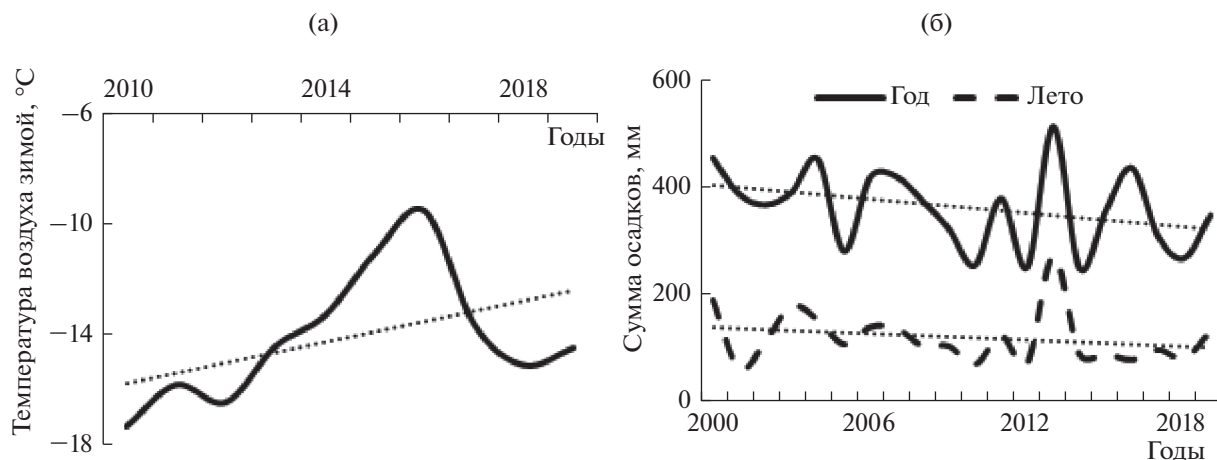
мониторинговым разрезам (рис. 1). Всего проанализировано 464 пробы.

Определяли температуру и величину прозрачности воды, реакцию среды (рН), содержание растворенного кислорода, трех форм минерального азота, минерального фосфора, общего железа и кремния. Динамику органического вещества (ОВ) в воде водохранилища оценивали по показателям цветности, перманганатной (ПО) и бихроматной (ХПК) окисляемости, БПК<sub>5</sub>. Минерализацию рассчитывали как сумму показателей главных ионов (на основании определения общей жесткости,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ). За величину минерального азота принимали сумму его аммонийной, нитритной и нитратной форм. Обработ-

ку гидрохимического материала осуществляли по общепринятым методикам фотометрического и титриметрического анализов. Объем водного притока к водохранилищу оценивали по материалам, доступным на сайте “Управление эксплуатации Ириклинского водохранилища”<sup>1</sup>. Данные по температуре воздуха и количеству осадков на территории Оренбургской области в рассматриваемый период получены из ресурсов ВНИИГМИ-МЦД<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Филиал “Управление эксплуатации Ириклинского водохранилища” ФГБВУ “Центррегионводхоз”. <http://ueiv.ru> (дата обращения 25.04.2020).

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). <http://www.meteo.ru> (дата обращения 01.03.2021).



**Рис. 2.** Изменения средней температуры приземного воздуха (а) и количества осадков (б) на территории Оренбургской области в 2000–2019 гг.

*Примечание:* здесь и на рис. 4–8 мелкими пунктирными линиями обозначены основные тенденции или тренды изменения показателей.

Многолетнюю динамику исследуемых ингредиентов оценивали по их среднесезонным концентрациям. Статистическую обработку данных выполняли с использованием программной среды MS Excel (2007), а также специализированного статистического пакета SPSS 13.0 (Apache Software Foundation, 2004). Для установления взаимосвязей между переменными использовали коэффициент корреляции ( $r$ ) Пирсона.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Краткая характеристика метеорологических и гидрологических условий.** На территории Оренбургской области среднегодовая приземная температура воздуха в период исследования колебалась в пределах 2.9–5.5°C. Наиболее значительные изменения произошли в холодное время года. Зарегистрирован рост зимних температур со скоростью около 0.4°C в год ( $R^2 = 0.22$  при  $p = 0.14$ ) (рис. 2а). За два десятилетия нового века отмечено уменьшение годового количества осадков ( $R^2 = 0.12$  при  $p = 0.07$ ) преимущественно за счет летних месяцев (рис. 2б).

Период 2010–2019 гг. характеризовался отсутствием выраженных тенденций в динамике межгодовых величин водного притока Ириклинского водохранилища (рис. 3). При этом можно отметить значительную амплитуду колебаний его объема. Например, 2010 и особенно 2019 г. были самыми маловодными, приток воды к водохранилищу в это время в количестве 0.63–0.80 км<sup>3</sup> был почти в 4 раза ниже, чем в многоводный период 2013–2014 гг.

Произошло и внутrigодовое перераспределение водного притока (рис. 4а). Его доля в зимний пери-

од достоверно увеличилась ( $R^2 = 0.52$ ,  $p = 0.03$ ) почти в 2 раза (с 6 до 15%), а в половодье, наоборот, наблюдалась слабая тенденция к снижению ( $R^2 = 0.27$ ,  $p = 0.12$ ). Минимальных значений (27–40%) доля весеннего притока достигла в 2013 и 2015 гг.

Особенности морфометрии водоема оказывают влияние на его термический режим. В исследуемые годы температура воды в водохранилище колебалась от 3.0°C в октябре до 28.5°C в июле. Весной наиболее прогретым оказывался верхний Чапаевский плес, летом температурный режим водохранилища был в основном равномерный. В октябре глубоководный Приплотинный плес остывал медленнее, и температура воды на его акватории была в среднем на 3.7°C выше, чем в верховье водоема.

Наиболее холодным было лето 2014 г.: средняя температура воды составила 19.2°C по сравнению с 23.0–23.2°C в 2011–2012 гг. (рис. 4б). Значимых трендов в межгодовой динамике июльской температуры воды в исследуемые годы не прослеживалось.

**Прозрачность воды, реакция среды (pH), кислородный режим.** Особенностью Ириклинского водохранилища, несмотря на его глубоководность и низкий водообмен, является относительно невысокая прозрачность воды во все сезоны (от 0.5 до 3.3 м) при средних значениях 1.5–1.8 м. Величина этого показателя определяется, главным образом, наличием взвешенных частиц, существенным источником которых может служить волновой изъём берегов с “мягкими породами” при ветрах значительной силы, характерных для района водохранилища (Соловых и др., 2003). Величина pH в большинстве проб сдвинута в щелочную сторо-

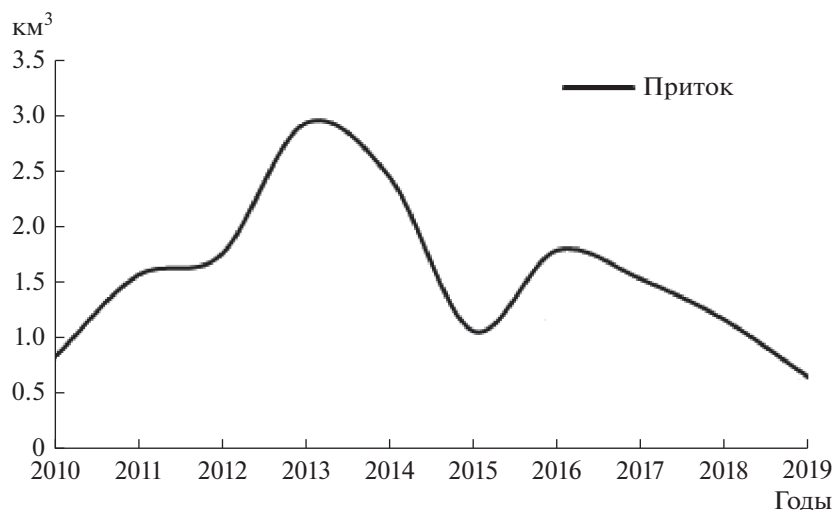


Рис. 3. Суммарный приток воды к Ириклинскому водохранилищу в 2010–2019 гг.

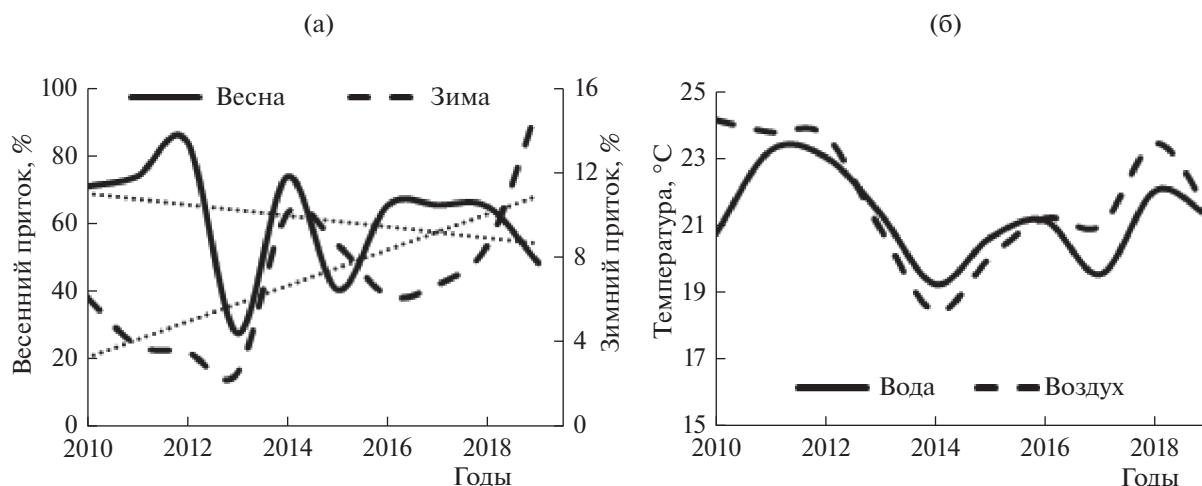


Рис. 4. Динамика весеннего и зимнего притока воды (в долях %) (а) и колебания средней за июль температуры воздуха и поверхностного горизонта воды (б) Ириклинского водохранилища в 2010–2019 гг.

ну (7.6–9.2). Наиболее высокие значения зарегистрированы в верховьях водоема.

Концентрация растворенного  $O_2$  колебалась в пределах 4.0–13.9 мг/л, низкие значения (<6.0 мг/л) отмечались в единичных придонных пробах. Весной и осенью в водоеме наблюдалась гомооксигенация, а в период летней стагнации, как правило, отмечалась стратификация по кислороду.

**Минеральный состав.** В макрокомпонентном составе воды Ириклинского водохранилища преобладающими анионами во все сезоны являются гидрокарбонаты, на долю которых приходится 23–26% (Шашуловская, Мосияш, 2020). Соотношение хлоридов и сульфатов практически одинаковое. К доминирующим катионам относятся,

главным образом, магний или натрий, причем их соотношение близко к единице.

В верховьях (Чапаевский и Софинский плесы) сумма солей весной наименьшая за счет наполнения водохранилища паводковыми водами, к осени минерализация возрастает. В Таналык-Суундукском и Приплотинном плесах минерализация в сезонном аспекте остается практически неизменной. Вероятно, в результате замедленного водообмена в нижней части водоема сохраняется водная масса, сформированная водами весеннего половодья (Шашуловская, Мосияш, 2020). В межгодовой динамике отмечено увеличение минерализации ( $R^2 = 0.37$ ,  $p = 0.07$ ) и основных ионов: суммы  $Na^+$  и  $K^+$  ( $R^2 = 0.72$ ,  $p = 0.01$ ), гидрокарбонатов и сульфатов ( $R^2 = 0.29–0.31$ ,  $p > 0.05$ ) (рис. 5а, б).

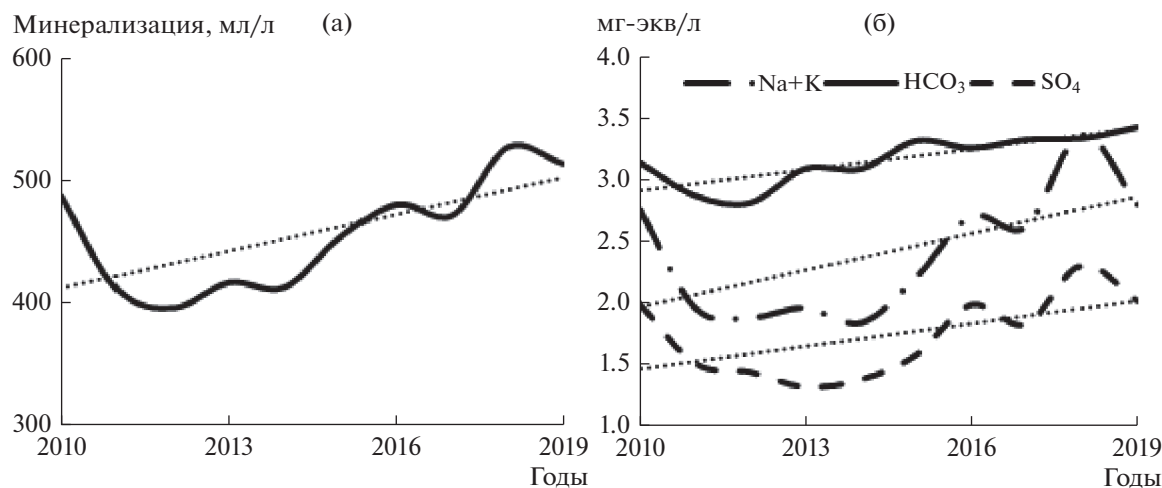


Рис. 5. Динамика минерализации (а) и некоторых главных ионов (б) в воде Ириклинского водохранилища в вегетационный период 2010–2019 гг.

**Органическое вещество.** Цветность воды, главным образом, характеризует содержание окрашенных гуминовых веществ аллохтонного происхождения. Максимальные величины показателя наблюдали весной (табл. 1). Тем не менее, осенние дождевые паводки, характерные для бассейна р. Урал, после взаимодействия с почвенным и растительным покровом на водосборе также приводят к увеличению интенсивности окраски воды. Так, в 2013 г. в период сильных дождевых осенних паводков, значения цветности превышали весенние в 2 раза. Однако, основное количество окрашенных веществ поступает в водохранилище в половодье: коэффициент корреляции между величиной цветности и объемом притока за апрель–май исследуемых лет составил 0.66 при  $p = 0.05$ . В верховье водохранилища величина цветности была в 1.5 раза выше, чем на остальной акватории (табл. 2).

По продольной оси водоема отмечается понижение значений ПО от Чапаевского плеса к Приплотинному (см. табл. 2). Пространственное распределение этого показателя было связано с цветностью

достоверными корреляционными отношениями весной ( $r = 0.82$  при  $p = 0.01$ ) и летом ( $r = 0.67$  при  $p = 0.05$ ). Осенью в результате вклада автохтонной органики в величину ПО достоверная корреляция с цветностью отсутствовала. В межгодовой динамике аллохтонного ОВ можно отметить отрицательную тенденцию ( $R^2 = 0.29–0.32$ ,  $p > 0.05$ ) (рис. 6).

Колебания концентрации легкоокисляемого ОВ (по БПК<sub>5</sub>) в исследуемый период наблюдали в широком диапазоне от 0.6 до 4.6 мгО<sub>2</sub>/л (см. табл. 1). По продольной оси отмечено снижение значений показателя, минимальные величины характерны для Приплотинного плеса (см. табл. 2). Более высокое содержание легкоокисляемой фракции ОВ в целом по водохранилищу регистрировали поздней весной и в летний период, а к осени наблюдали снижение средних концентраций.

Максимальное содержание общего ОВ (по ХПК) зафиксировано в Чапаевском плесе. Сезонная динамика показателя слабо выражена (см. табл. 2). В летний период наблюдалась высокая достоверная связь ХПК с величиной БПК<sub>5</sub> ( $r = 0.70$ , при  $p = 0.03$ ). Вероятно, при повышении темпера-

Таблица 1. Сезонная динамика органического вещества в воде Ириклинского водохранилища в 2010–2019 гг.

Показатель	Весна		Лето		Осень	
	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$
Цветность, град.	13.9–30.1	21.5 ± 2.0	13.1–21.5	16.8 ± 0.9	7.5–26.6	15.4 ± 2.3
ПО, мгО/л	4.6–8.3	5.9 ± 0.4	4.2–5.9	5.1 ± 0.2	3.3–6.0	4.9 ± 0.3
ХПК, мгО/л	24–32	29 ± 1	22–32	26 ± 1	18–30	26 ± 2
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	1.5–3.3	2.4 ± 0.3	0.7–4.6	2.2 ± 0.4	0.7–4.0	2.2 ± 0.5
ПО/ХПК, %	–	20	–	20	–	19

Примечание. Здесь и в табл. 2–5: min–max – диапазон колебания показателя,  $M \pm m$  – среднее значение и его ошибка.

**Таблица 2.** Содержание органического вещества на различных участках Ириклинского водохранилища в 2010–2019 гг.

Показатель/ Место отбора проб	Цветность, град.		ПО, мгО/л		ХПК, мгО/л		БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	
	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$
Чапаевский плес	17.3–29.7	23.4 ± 1.4	4.6–7.5	5.9 ± 0.3	27–37	31 ± 1	1.8–4.2	2.9 ± 0.3
Софинский плес	12.8–29.4	22.9 ± 2.1	4.4–7.9	5.8 ± 0.4	22–35	27 ± 1	1.6–3.9	2.5 ± 0.3
Таналык-Суундукский плес	11.3–23.1	16.3 ± 1.5	3.9–6.6	5.1 ± 0.2	21–33	27 ± 1	1.0–4.0	2.3 ± 0.3
Приплотинный плес	11.4–22.4	15.2 ± 1.2	3.8–5.8	4.8 ± 0.2	23–30	26 ± 1	0.6–3.9	2.0 ± 0.4

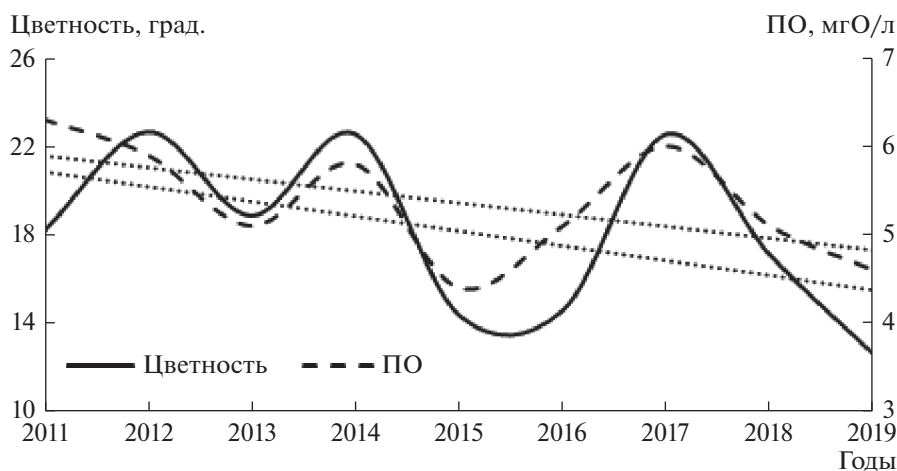
туры существенную долю в общем ОВ составляло автохтонное вещество, образующееся при фотосинтетической активности фитопланктона. Значимых тенденций в межгодовых колебаниях общего ОВ, как и легкоокисляемого, за исследованный период не отмечено.

**Биогенные элементы.** В Ириклинском водохранилище преобладающей формой минерального азота является аммоний, содержание которого в течение вегетационного сезона 2010–2019 гг. колебалось в диапазоне: от <0.04 до 0.38 мгN/л (табл. 3, 4). Наиболее высокие величины отмечены весной и летом. В период половодья установлена достоверная связь ( $r = 0.69$ ,  $p = 0.04$ ) между концентрацией аммония и объемом водного притока. Летом и осенью в результате интенсификации минерализационных процессов в воде накапливаются минеральные формы азота и, в первую очередь, ионы аммония. Коэффициент корреляции  $r$  между показателями ХПК и аммонийным азотом летом составил 0.73 при  $p = 0.02$ , осенью – 0.70 при  $p = 0.04$ . Максимальные концентрации аммония в исследуемый период отмечены в верховье водоема в Чапаевском и Софинском плесах, на остальной акватории его величины были

почти в 2 раза ниже (см. табл. 4). Стратификация по содержанию аммония наиболее выражена в глубоководном Таналык-Суундукском плесе. В весенний и летний периоды верхние слои прогревались более быстрыми темпами и содержание ионов аммония в поверхностном горизонте на отдельных участках было в 1.4–4.0 раза выше, чем в придонном. За рассматриваемые годы отмечено достоверное снижение не только весенних, но и средневегетационных концентраций азота аммония ( $R^2 = 0.56–0.76$  при  $p < 0.05$ ) (рис. 7а).

Низкое содержание нитритов, в основном от <0.006 до 0.028 мгN/л, свидетельствует о свободном протекании процесса нитрификации в водохранилище. Максимальные концентрации 0.13–0.17 мгN/л отмечены эпизодически в весенний период на литоральных участках, что указывает на поступление этих соединений с водосбора.

Распределение нитратов по продольной оси водохранилища, такое же, как и аммонийного иона: максимальные концентрации характерны для верхних плесов, где сильнее сказывается влияние половодья (см. табл. 4). Стратификация по иону  $\text{NO}_3^-$  выражена в большей степени на глубоководных нижних плесах. В сезонной динамике

**Рис. 6.** Изменение содержания аллохтонного ОВ (по показателям цветности и ПО) в воде Ириклинского водохранилища в вегетационный период 2011–2019 гг.

**Таблица 3.** Сезонная динамика биогенных элементов в воде Ириклинского водохранилища в 2010–2019 гг.

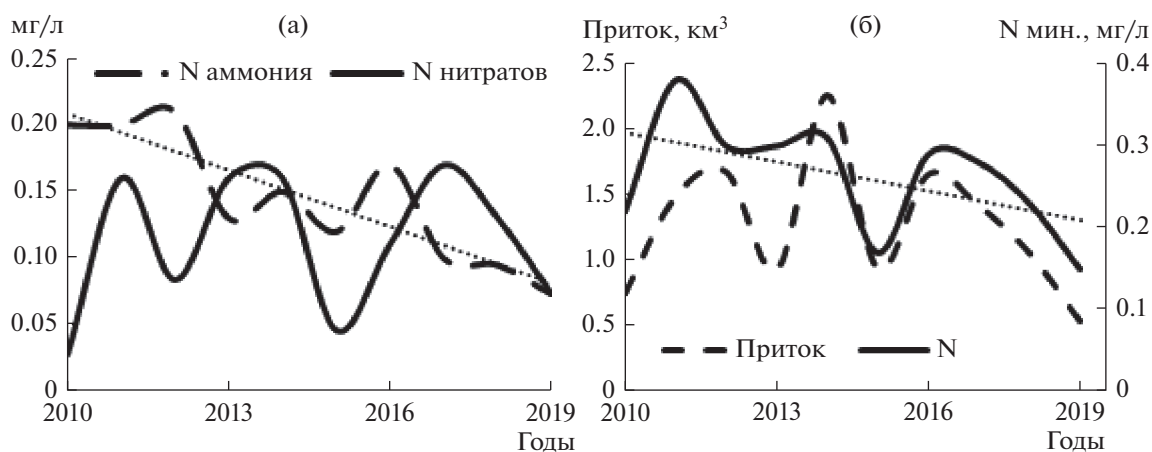
Показатель	Весна		Лето		Осень	
	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$
Азот аммония, мг/л	0.06–0.28	$0.16 \pm 0.02$	0.06–0.23	$0.15 \pm 0.02$	<0.04–0.19	$0.11 \pm 0.02$
Азот нитратов, мг/л	<0.02–0.37	$0.16 \pm 0.04$	0.03–0.14	$0.07 \pm 0.01$	<0.02–0.42	$0.12 \pm 0.04$
Фосфор фосфатов, мг/л	0.020–0.060	$0.040 \pm 0.004$	0.022–0.055	$0.037 \pm 0.003$	0.043–0.066	$0.052 \pm 0.002$
Кремний, мг/л	1.6–3.3	$2.5 \pm 0.2$	1.5–2.7	$2.2 \pm 0.1$	1.5–3.7	$2.5 \pm 0.2$
Железо, мг/л	0.11–0.31	$0.19 \pm 0.02$	0.09–0.25	$0.15 \pm 0.01$	0.06–0.25	$0.16 \pm 0.02$

**Таблица 4.** Содержание биогенных элементов на различных участках Ириклинского водохранилища в 2010–2019 гг.

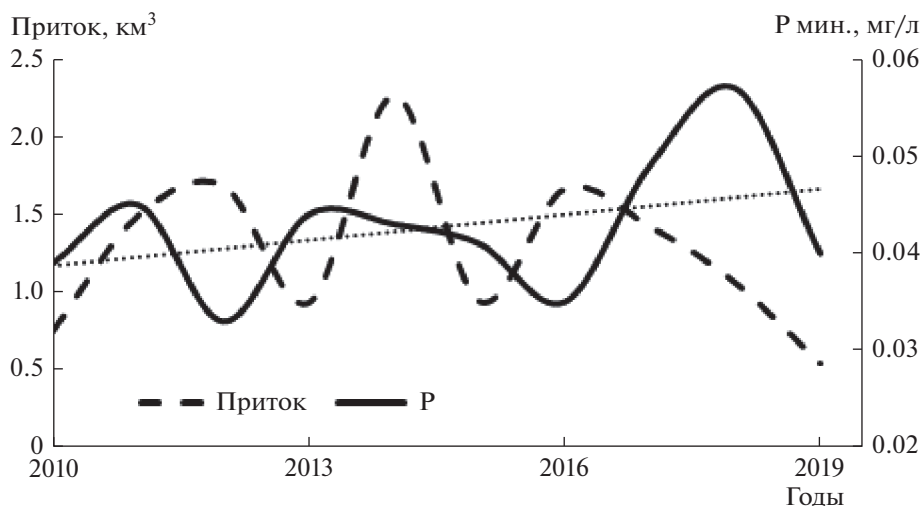
Показатель/ Место отбора проб	Азот аммония, мг/л		Азот нитратов, мг/л		Фосфор фосфатов, мг/л		Кремний, мг/л		Железо, мг/л	
	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$
Чапаевский плес	0.10–0.30	$0.22 \pm 0.02$	0.02–0.27	$0.15 \pm 0.03$	0.06–0.10	$0.07 \pm 0.00$	2.6–4.4	$3.4 \pm 0.2$	0.15–0.33	$0.23 \pm 0.02$
Софинский плес	0.10–0.38	$0.18 \pm 0.02$	<0.02–0.42	$0.18 \pm 0.04$	0.04–0.08	$0.05 \pm 0.00$	1.4–3.6	$2.8 \pm 0.2$	0.11–0.32	$0.21 \pm 0.02$
Таналык-Суундукский плес	0.07–0.19	$0.13 \pm 0.01$	0.03–0.24	$0.11 \pm 0.02$	0.02–0.05	$0.03 \pm 0.00$	1.3–2.6	$2.1 \pm 0.1$	0.10–0.21	$0.14 \pm 0.01$
Приплотинный плес	0.04–0.19	$0.10 \pm 0.01$	0.03–0.16	$0.09 \pm 0.01$	0.02–0.05	$0.04 \pm 0.00$	1.2–3.0	$2.2 \pm 0.2$	0.08–0.15	$0.11 \pm 0.01$

максимальные концентрации наблюдали в период весеннего половодья (см. табл. 3). В это время отмечена сильная корреляционная связь ( $r = 0.83$ ,  $p = 0.01$ ) между содержанием нитратов и величинами цветности воды, свидетельствующая о значительной роли водосбора в балансе ингреди-

та. В летний период фиксировали существенное снижение концентрации нитратного азота вследствие его потребления автотрофами (см. табл. 3). Осенью отмечена сильная корреляция между содержанием нитратов и притоком ( $r = 0.93$ ,  $p < 0.5$ ). Межгодовая динамика нитратов, в отличие от ам-

**Рис. 7.** Динамика форм минерального азота (а) и изменения концентраций минерального азота и притока воды (б) Ириклинского водохранилища в вегетационный период 2010–2019 гг.





**Рис. 8.** Динамика минерального фосфора и притока воды Иртишского водохранилища в вегетационный период 2010–2019 гг.

мония, не имеет выраженного тренда (см. рис. 7а) и коррелирует с величинами годового притока ( $r = 0.82$ ,  $p = 0.00$ ).

В целом, за исследуемый период отмечена сильная связь содержания минерального азота и объема притока в вегетационный сезон ( $r = 0.70$ ,  $p = 0.02$ ), в межгодовой динамике прослеживается слабая тенденция снижения ( $R^2 = 0.26$  при  $p = 0.13$ ) его концентрации (рис. 7б).

Содержание фосфора минерального колебалось в более узких пределах, чем соединений азота (см. табл. 3, 4), но на отдельных станциях в летний период наблюдалось существенное повышение его концентраций до 0.14–0.17 мг/л. По продольной оси водохранилища отмечено снижение количества фосфатов, концентрации которых в верховье были почти в 2 раза выше, чем на приплотинном участке. Стратификацию по фосфору наблюдали на многих станциях. Наибольшее различие между поверхностным и придонным горизонтом по содержанию этого элемента (в 2.9–3.2 раза) отмечено в летний период на Приплотинном плесе в условиях пониженного содержания растворенного кислорода (до 4 мг/л). В период половодья фиксировали наличие корреляции ( $r = 0.68$  при  $p = 0.04$ ) между содержанием фосфора и цветностью. В сезонной динамике отмечено увеличение содержания фосфатов к осени (см. табл. 3), в годы повышенной водности концентрация этого элемента снижалась (рис. 8). За 2010–2019 гг. прослеживалась слабая тенденция увеличения ( $R^2 = 0.14$  при  $p = 0.30$ ) содержания фосфора в воде Иртишского водохранилища.

В период весеннего половодья отмечена достоверная положительная связь содержания растворенного кремния с величиной притока воды к

водохранилищу ( $r = 0.81$  при  $p = 0.01$ ) (рис. 9а), с цветностью и ПО ( $r = 0.72$ – $0.75$  при  $p < 0.05$ ), что может указывать на поступление элемента с водосбора в виде кремнийорганических комплексов. В летний период концентрация Si несколько снижалась (см. табл. 3) в результате вовлечения элемента в биологический круговорот. Стратификация содержания кремния отмечена в летний период на акватории Приплотинного плеса. В межгодовой динамике следует отметить тенденцию ( $R^2 = 0.31$ ,  $p = 0.06$ ) снижения концентрации элемента.

Количество общего железа за исследуемые годы изменялось в диапазоне от 0.06 до 0.31 мг/л, максимальные величины характерны для весеннего периода (см. табл. 3). В это время корреляционный анализ выявил значимые связи ( $p < 0.5$ ) содержания железа с объемом притока к водохранилищу ( $r = 0.57$ ), с ПО ( $r = 0.89$ ) и цветностью воды ( $r = 0.75$ ). Придонные горизонты содержали, как правило, более высокие (в среднем в 1.2–1.3 раза) концентрации элемента. Наибольшая стратификация характерна для Чапаевского и Таналык-Суундукского плесов. Объем весеннего притока определяет содержание железа в течение всего вегетационного сезона (рис. 9б). Коэффициент корреляции между этими показателями составил 0.74 при  $p = 0.02$ . Максимальные концентрации зарегистрированы в верховьях водохранилища. Тренда изменений концентрации железа за исследуемый период не зарегистрировано.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенностью бассейна р. Урал, в отличие от других рек ЕЧР, является крайняя неравномерность многолетней динамики годового стока, ко-

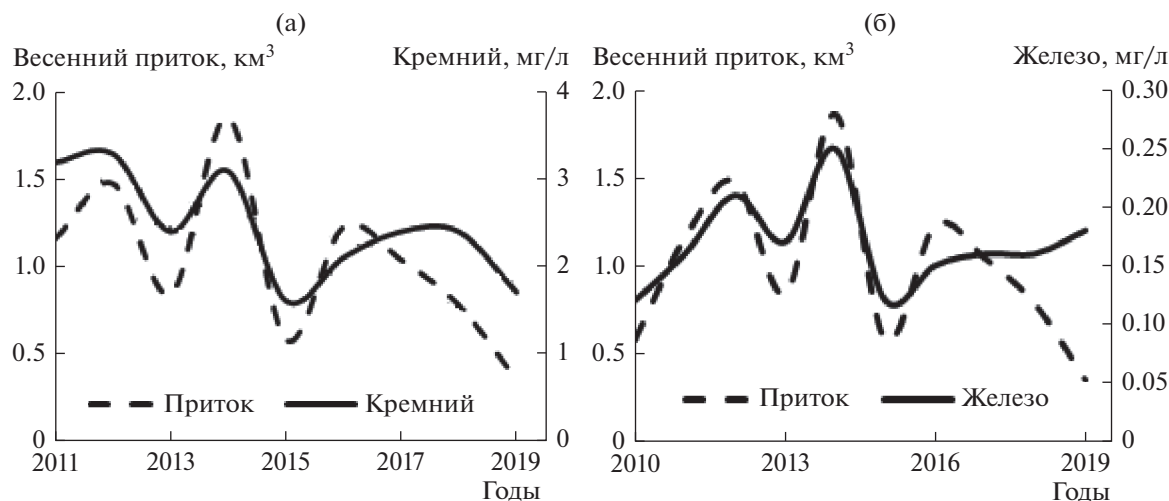


Рис. 9. Изменения содержания кремния весной (а) и общего железа в вегетационный сезон (б) в воде Ириклинского водохранилища от притока в половодье в 2010–2019 гг.

торая выражается в сложном чередовании циклов различной водности и продолжительности (Сивохиц и др., 2019), и, как следствие, отсутствию достоверных трендов (Научно-прикладной ..., 2021). Формирование гидрохимического режима Ириклинского водохранилища во втором десятилетии XXI в. происходит в условиях маловодной фазы. Основной приходной составляющей стока являются атмосферные осадки. Их сезонное распределение на территории Оренбургской области, как и всего Южноуральского региона, неравномерно, в связи с чем наблюдаются длительные засухи. Испарение с водной поверхности может превышать количество осадков в 2 раза (Чибилев и др., 2006). Исследования показали, что на фоне глобального потепления в последние десятилетия в средних широтах наблюдается рост количества осадков над сушей, на юге ЕЧР, в частности на Южном Урале, наоборот, увеличивается повторяемость и интенсивность засух в летний период (Васильев и др., 2020; Черенкова, Сидорова, 2021). Снижение количества осадков в летний период, а также в целом за год и увеличение амплитуды их колебаний на территории Оренбургской области (см. рис. 2б) отражает общую тенденцию, характерную в начале XXI в. для южных регионов ЕЧР. По сравнению с 70–80-ми годами прошлого столетия количество осадков в настоящее время практически не изменилось, однако увеличилась амплитуда и максимальные значения (табл. 5), что также можно считать аргументами в пользу возросшей изменчивости климата в современных условиях (Доклад ..., 2020).

Увеличение доли притока к Ириклинскому водохранилищу в межлетний зимний период и снижение в половодье в последнее десятилетие отражает современную эколого-гидрологиче-

скую обстановку на большинстве рек ЕЧР (Научно-прикладной ..., 2021). Причина такого явления – увеличение приземной температуры воздуха в зимний период, что приводит к частым оттепелям. На территории Оренбургской области наиболее заметные изменения в приземной температуре воздуха произошли в последнем десятилетии, когда почти на 1°С увеличились средняя температура за июль и, как следствие, ее среднегодовое значение (см. табл. 5). В результате зимнего потепления образовавшаяся влага расходуется на пополнение подземных вод, что приводит к дефициту объема весеннего половодья. Увеличение доли подземного питания водохранилищ сопровождается ростом минерализации воды в них, что наблюдается и в Ириклинском водохранилище в межгодовой динамике 2010–2019 гг. В первую очередь отмечено повышение сульфатов, гидрокарбонатов и суммы щелочных элементов (см. рис. 5а, б). Кроме того, в засушливых регионах потепление может усиливать процессы засоления почв на водосборах, приводить к возрастанию минерализации вследствие превышения испарения над осадками (Моисеенко и др., 2011).

По сравнению с 70–80-ми годами прошлого столетия в воде Ириклинского водохранилища снизилась доля кальция и сульфатов за счет увеличения магния и гидрокарбонатов (Шашуловская, Мосияш, 2020), однако, величина минерализации осталась на прежнем уровне (см. табл. 5). Вероятными причинами произошедшей трансформации могут быть изменения климатических условий и хозяйственной деятельности на водосборе.

Основной фазой водного режима Ириклинского водохранилища является весеннее половодье, во время которого в водоем поступает до 40–

**Таблица 5.** Статистические показатели некоторых климатических параметров на территории Оренбургской области и гидрохимических показателей Ириклинского водохранилища в 1975–2019 гг.

Показатель	1975–1983 гг.*		1986–1990 гг.**		2010–2019 гг.	
	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$	min–max	$\bar{M} \pm m$
Сумма осадков, мм	214–374	327 ± 18	291–506	380 ± 23	248–514	336 ± 28
Среднегодовая температура воздуха, °С	1.8–5.5	3.7 ± 0.4	2.5–4.6	3.7 ± 0.4	2.9–5.5	4.6 ± 0.3
Средняя температура зимы, °С	–17.3–(–10.1)	–13.5 ± 0.8	–13.9–(–10.9)	–12.5 ± 0.6	–15.3–(–7.7)	–12.3 ± 0.8
Средняя температура за июль, °С	18.2–22.8	20.9 ± 0.5	18.7–23.0	20.9 ± 0.9	18.4–24.1	21.8 ± 0.6
Минерализация, мг/л	465–510	487 ± 5	–	–	370–554	463 ± 21
ПО, мгО/л	3.7–4.5	3.9 ± 0.1	–	–	4.2–6.7	5.3 ± 0.3
ХПК, мгО/л	17–27	22 ± 1	28–34	31 ± 2	23–32	27 ± 1
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	–	–	2.3–3.2	2.9 ± 0.2	1.4–3.0	2.2 ± 0.2
ПО/ХПК, %	14–26	18 ± 1	–	–	15–24	20 ± 1
N-NH <sub>4</sub> , мг/л	0.07–0.78	–	0.17–0.36	0.26 ± 0.04	0.08–0.21	0.16 ± 0.01
N-NO <sub>3</sub> , мг/л	–	–	0.03–0.15	0.08 ± 0.02	0.07–0.21	0.12 ± 0.02
Fe общее, мг/л	0.05–0.22	–	0.06–0.27	0.17 ± 0.06	0.12–0.25	0.17 ± 0.01

Примечания. \* по (Соловых и др., 2003); \*\* по (Чибилев и др., 2006), “–” – данные отсутствуют.

85% водной массы, содержащей значительные количества ОБ и биогенных элементов. Кроме того, возможны локальные воздействия – поверхностно-склоновый сток во время дождевых летних или осенних паводков, сточные промышленно-бытовые воды.

Значительная часть аллохтонного ОБ поступает в Ириклинское водохранилище с речным притоком весной. В это время в водоем привносятся вещества гуминовой природы терригенного происхождения, включающие продукты неполного разложения растительных и животных остатков. Нами отмечена сильная корреляционная связь цветности воды и объема притока к водохранилищу в весенний период, что позволило предположить аллохтонный источник в генезисе этой группы веществ. В межгодовой динамике аллохтонного ОБ Ириклинского водохранилища просматривается отрицательная тенденция. Причиной такого явления могло стать сокращение количества осадков на территории центра ЕЧР в начале XXI в. (Доклад ..., 2020), что способствовало, вероятно, уменьшению концентрации гумусовых веществ, вымываемых из верхних горизонтов почв. Взаимосвязь между интенсивностью осадков и содержанием растворенного ОБ фиксировали для мелководного озера в Южной Америке и для реальных озер Швеции (Bastidas Navarro and Modenutti, 2012; Weyhenmeyer et al., 2016). Авторы работы (Kokorite et al., 2012) при анализе долгосрочных изменений концентрации растворенного ОБ и цветности в речных водах Латвии

объясняют положительные тенденции этих показателей в том числе и увеличением осадков.

Количество аллохтонного ОБ в Ириклинском водохранилище невелико, о чем свидетельствуют низкие величины ПО, обусловленные геохимическими особенностями водосборной территории гидрографического региона Южного Зауралья – отсутствием болот и торфяников, т.е., источников гуминовых кислот (Соловых и др., 2003). Значительная часть ОБ в водохранилище преимущественно автохтонного происхождения (образуется в результате фотосинтеза и деструкции детрита). Возможно, значительное время водообмена водоема (один раз в два года) способствует осаждению аллохтонного ОБ и накоплению автохтонного. О том, что ОБ в водохранилище в основном внутриводоемного происхождения свидетельствуют не только малые значения ПО, но и отношение ПО/ХПК (Скопинцев, Гончарова, 1987). Величины ПО/ХПК достигали 19–20%, слабо изменяясь по сезонам (см. табл. 1), в то время как в водоемах Карелии (например, в Онежском озере) это соотношение весной достигало 42–55% (Сабелина и др., 2010). В некоторых водоемах (Структура ..., 2018; Shashulovskaya et al., 2021) величина БПК<sub>5</sub> в течение вегетационного сезона положительно коррелирует с температурой воды. Для Ириклинского водохранилища вследствие больших глубин температурный фактор не оказывает значительного влияния на содержание лабильного ОБ (Шашуловская, Мосияш, 2019).

Основная масса ионов аммония поступает в Ириклинское водохранилище весной с водами половодья. В это время между содержанием  $\text{NH}_4^+$  и объемом притока отмечена сильная достоверная связь. В межгодовой динамике азота аммония за рассматриваемые годы отмечено достоверное снижение не только весенних, но и средневегетационных концентраций, причина которого может заключаться в уменьшении объема весеннего притока, а также более активного вовлечения азота в биогеохимические циклы. Было подсчитано (Vegaart et al., 2011), что потепление удваивает скорость денитрификации в мелководных озерах. Температурная зависимость денитрификации объясняется в том числе и уменьшением концентрации кислорода из-за снижения растворимости с повышением температуры. На ускорение темпов денитрификации при потеплении в результате образования аноксичной среды указывают и другие авторы (Chou et al., 2021). Снижение содержания аммонийного азота в начале XXI в. отмечено в воде водохранилищ Верхней и Нижней Волги (Кирпичникова и др., 2020; Shashulovskaya et al., 2021), а также Днепровского каскада (Жежеря и др., 2021).

В отличие от аммония, межгодовая динамика нитратов в воде Ириклинского водохранилища не имеет выраженного тренда и зависит в большей степени от величин годового притока. В волжских водохранилищах, а также Каневском и Кременчугском в начале XXI в. наблюдается снижение содержания нитратов (Жежеря и др., 2021; Структура ..., 2018; Shashulovskaya et al., 2021).

С органическим веществом гумусовой природы, поступающим весной в Ириклинское водохранилище, химически связаны фосфор, кремний и железо. Между концентрациями этих соединений и цветностью воды зафиксирована достоверная корреляционная связь.

В отличие от соединений минерального азота гидрологические факторы в меньшей степени влияют на содержание фосфатов, доминирующую роль в их генезисе играют внутриводоемные процессы. Стратификация в летний период на глубоководных участках в условиях пониженного содержания кислорода может свидетельствовать о поступлении фосфора из донных отложений, на что указано во многих исследованиях (Мартынова, 2008; Boström et al., 1988; Doig et al., 2017; Søndergaard et al., 1999). Известно, что основным лимитирующим элементом для первичной продуктивности, а, следовательно, критерием в оценке степени эвтрофирования водных экосистем часто является фосфор (О'Келли, 1977; Carvalho et al., 2013), а его происхождение связывают с внутренней биогенной нагрузкой — выделением из донных отложений и экскрецией гидробионтами (Alimov and Golubkov, 2014). Зафиксированная нами за исследуемый период слабая

тенденция увеличения содержания фосфатов в воде Ириклинского водохранилища может служить показателем ускорения процесса эвтрофирования. Скорость мобилизации этого элемента в условиях потепления климата, очевидно, будет увеличиваться. Для сравнения, за все время существования Волгоградского водохранилища среднее содержание фосфатов было достаточно стабильным в интервале от 0.051 до 0.059 мгР/дм<sup>3</sup> (Shashulovskaya et al., 2021).

В воде Ириклинского водохранилища, как и в других природных водоемах (Камбалина и др., 2014), наиболее распространены ассоциации кремниевой кислоты с гумусовыми веществами, которые могут поступать с водосборной территории, главным образом, в результате химического и биологического выветривания и последующего растворения кремнийсодержащих минералов. В летний период количество  $\text{SiO}_2$  в воде водохранилища уменьшается, вероятно, из-за потребления диатомовыми водорослями. В межгодовой динамике количество этого элемента за исследованный период снижается одновременно с уменьшением объема половодий. Отрицательная тенденция кремния в последние годы характерна также для некоторых искусственных водоемов Днепра и Нижней Волги (Жежеря и др., 2021; Shashulovskaya et al., 2021).

Специфика геологического строения территории Южного Урала — широкое распространение рудных месторождений — обуславливает повышенное фоновое содержание металлов, в том числе железа, в подземных и поверхностных водах (Фашевская и др., 2018). Средневегетационная концентрация общего железа в воде Ириклинского водохранилища коррелирует с объемом весеннего притока ( $r = 0.74$  при  $p = 0.02$ ). Синхронность нарушается в период 2017–2019 гг., когда в период маловодья, очевидно, из-за слабого промерзания почвы и усиления влияния грунтового стока содержание железа в воде водохранилища возрастает (см. рис. 9б). В межгодовой динамике значимых изменений в содержании общего железа не зарегистрировано.

Между тем, в ряде северных пресных водоемов отмечено увеличение содержания этого элемента в последние десятилетия (Björnerås et al., 2017), что связано с повышением уровня грунтовых вод на фоне климатических изменений. Например, в Карелии более мягкие зимы, увеличение количества оттепелей, более слабое промерзание почвы приводят к повышению объемов зимнего водного стока, и, как следствие, к увеличению концентрации железа в реках (Калинкина и др., 2018). Зимнее потепление приводит к увеличению объема вод, богатых ОВ гумусовой природы, поступающих из верхних участков водохранилищ Верхней Волги и р. Камы, что вызывает увеличение цвет-

ности воды и содержания железа в нижеволжских водохранилищах (Shashulovskaya et al., 2021).

Сравнивая содержание компонентов органического вещества и биогенных элементов в воде Ириклинского водохранилища в настоящее время с периодом 1970–1980-х годов, следует отметить стабильность концентраций общего и легкоокисляемого ОВ, азота нитратов и общего железа (см. табл. 5). Изменения в большей степени произошли в последнее десятилетие в динамике гидрохимических компонентов, связанных с внутригодовым перераспределением стока. Как результат, отмечены отрицательные тренды аллохтонного ОВ, аммонийного азота и кремния. Стабильность средних концентраций железа в воде Ириклинского водохранилища объясняется отсутствием на водосборе заболоченных территорий, изменения стока с которых при зимнем потеплении приводит к возрастанию количества вымываемых гумусовых веществ с большим содержанием этого элемента.

Особенности морфометрии и гидрологии водоема способствуют неравномерности распределения по продольной оси основных гидрохимических показателей. В верхней зоне (Чапаевский и Софинский плесы), характеризующейся меньшими глубинами и шириной, сильнее сказывается влияние половодья. Здесь отмечены более высокие концентрации ОВ и биогенных элементов, приносимых, очевидно, с загрязненными водами из вышерасположенных водохранилищ. Вследствие низкого водообмена до нижних глубоководных плесов с большой площадью акватории паводковая волна доходит, вероятно, только в многоводные годы. За счет внутриводоемных процессов (смещения, адсорбции, осаждения, окисления и др.) эти участки отличались пониженными концентрациями ОВ и биогенных элементов. Это подтверждает и величина минерализации воды, концентрация которой в нижних плесах в сезонном аспекте остается практически неизменной (Шашуловская, Мосияш, 2020). Следует отметить, что глубоководные нижние плесы, где практически отсутствует течение, являются “идеальными” зонами осадконакопления. Здесь образуются донные отложения, в которых, вероятно, могут накапливаться не только минеральные соли, но и, как было показано проведенными нами ранее исследованиями (Шашуловская и др., 2017), ОВ, биогенные элементы и некоторые тяжелые металлы. Таким образом, водохранилище является своего рода биологическим отстойником, существенно повышая самоочищающую способность р. Урал.

Потепление климата, наблюдающееся по всему земному шару с конца 1980-х годов, приводит к снижению эффекта самоочищения речного стока в малопроточных водохранилищах умеренной зоны (Datsenko and Puklakov, 2020). Например, в

Можайском водохранилище прогрессирующая эвтрофикация увеличивает долю автохтонного ОВ в воде в течение вегетационного периода. В результате удержание растворенного ОВ в водохранилище превышает 50% от его общего поступления в водоем (Datsenko and Puklakov, 2020).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование гидрохимического режима Ириклинского водохранилища во второе десятилетие XXI в. происходит в условиях трансформации климата и отражает современную эколого-гидрологическую обстановку на большинстве рек ЕЧР. Несмотря на отсутствие направленных тенденций в межгодовых колебаниях суммарного притока воды к водохранилищу, отмечены заметные изменения в его внутригодовом перераспределении: доля в зимний период достоверно увеличивается в 2 раза, а в половодье наблюдается тенденция к снижению. Такая трансформация происходит на фоне увеличения приземных средних температур воздуха как в летний, так и зимний период. В результате возрастает доля грунтовых вод, питающих водоем в межень и, как следствие, увеличивается величина минерализации за счет повышения содержания сульфатов, гидрокарбонатов и суммы щелочных элементов.

Снижение объема притока к водохранилищу в половодье и уменьшение количества осадков в центральных районах ЕЧР в начале XXI в. явилось, по всей вероятности, причиной отрицательных трендов аллохтонного ОВ, аммонийного азота, кремния. Есть основания полагать, что более активное вовлечение минерального азота в биогеохимические циклы привело к снижению концентраций аммония за исследованный период. Содержание нитратов связано с величиной весеннего половодья в меньшей степени, их динамика определяется, в основном, объемом притока за год. В отличие от соединений минерального азота гидрологические факторы незначительно влияют на содержание фосфатов Ириклинского водохранилища. Накопление за вегетационный сезон и повышение количества в годы пониженной водности свидетельствуют о доминирующей роли внутриводоемных процессов в генезисе фосфора. Отмеченная нами тенденция повышения содержания фосфатов в воде Ириклинского водохранилища в последнее десятилетие, вероятно, будет продолжаться в условиях дальнейшего потепления климата.

По сравнению с периодом 1970–1980-х годов основные компоненты гидрохимического состава Ириклинского водохранилища не претерпели значительных изменений, что свидетельствует об устойчивости экосистемы водоема. Стабильность концентраций общего железа определяется отсутствием на водосборе заболоченных террито-

рий, которые в условиях зимнего потепления наряду с гумусовым веществом являются поставщиками этого элемента в водные объекты.

Особенности морфометрии водоема определяют пространственную динамику компонентов солевого состава, ОВ и биогенных элементов, максимальные концентрации которых поступают с основным притоком р. Урал и отмечены в верховье водоема. В нижних плесах происходит уменьшение их содержания в результате внутриводоемных процессов. Таким образом, водохранилище выполняет роль биологического отстойника, существенно повышая самоочищающую способность р. Урал. Вследствие больших глубин водоема этот процесс может протекать, вероятно, на протяжении сотни лет, не приводя к значительному вторичному загрязнению водной толщи.

Полученные результаты могут иметь важное значение для выявления тенденций изменения гидрохимического режима водохранилищ разных географических зон в условиях глобальной трансформации климата.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 076-00005-20-02.

#### FUNDING

The work was carried out within the framework of State Assignment no. 076-00005-20-02.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам из Саратовского филиала ФГБНУ «ВНИРО» И.Г. Филимоновой, Л.В. Гришиной и Е.Г. Кузиной за помощь в обработке гидрохимического материала, а также всем сотрудникам, принимавшим участие в отборе проб.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the colleagues from the Saratov Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography I.G. Filimonova, L.V. Grishina and E.G. Kuzina for help in processing the hydrochemical material, as well as to all the staff who took part in the sampling.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Балабанова З.М.* Гидрохимическая характеристика Ириклинского водохранилища // Тр. Уральского отд. Сиб. науч.-исслед. ин-та рыбного хозяйства. 1971. Т. 8. С. 27–46.

*Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Семенов В.А., Чибилев А.А.* Оценка тенденций изменения засухливости для территории Южного Урала в период 1960–2019 гг.

с использованием различных методов // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 494. № 1. С. 91–96.

*Вишневский В.И.* Гідролого-гідрохімічний режим дніпровських водосховищ // Гідробіол. журн. 2020. № 2. С. 103–120.

*Георгиевский В.Ю.* Водные ресурсы Российской Федерации в условиях изменяющегося климата // Гидрометеорология и экология: Тр. II Всерос. конф. 2018. С. 169–171.

*Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А.* Изменение зимнего стока рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 15. № 6. С. 581–588.

*Дмитриева В.А., Нефедова Е.Г.* Гидрологическая реакция на меняющиеся климатические условия и антропогенную деятельность в бассейне Верхнего Дона // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 285–297.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М., 2020. 97 с.

*Жежеря В.А., Жежеря Т.П., Линник П.М.* Біогенні речовини у воді водосховищ Дніпровського каскаду після зарегулювання стоку Дніпра // Гідробіол. журн. 2021. № 6. С. 89–109.

*Калинкина Н.М., Филатов Н.Н., Теканова Е.В., Балаганский А.Ф.* Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // Региональная экология. 2018. № 2. С. 65–73.

*Камбалкина М.Г., Скворцова Л.Н., Мазурова И.С., Гусева Н.В., Бакибаев А.А.* Исследование форм нахождения кремния в природных водах с высоким содержанием растворенных органических веществ // Изв. Томск. политех. ун-та. Химия и химические технологии. 2014. Т. 325. № 3. С. 64–70.

*Кирпичникова Н.В., Лапина Е.Е., Кудряшова В.В.* Многолетняя динамика содержания азота и фосфора в грунтовых водах водосбора Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 536–545.

*Корнева Л.Г., Лазарева В.И., Минеева Н.М., Сигарева Л.Е., Соколова Е.А., Тимофеева Н.А., Митропольская И.В., Соловьева В.В.* Состояние и динамика биологических сообществ Рыбинского водохранилища в условиях изменения климата // Журн. Сиб. фед. ун-та. Серия: Биология. 2019. Т. 12. № 2. С. 160–179.

*Лазарева В.И., Степанова И.Э., Цветков А.И., Пряничникова Е.Г., Перова С.Н.* Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона и зообентоса // Тр. Ин-та биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2018. № 81 (84). С. 47–84.

*Линник П.М.* Кліматичні зміни як важливий чинник формування хімічного складу поверхневих вод у сучасних умовах (огляд) // Гідробіол. журн. 2020. Т. 56. № 5. С. 87–106.

*Мартынова М.В.* Влияние химического состава донных отложений на внутреннюю фосфорную нагрузку // Водные ресурсы. 2008. № 3. С. 358–363.

*Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Хорошавин В.Ю.* Прогноз влияния возможного потепления климата на химический состав вод суши // ДАН. 2011. Т. 441. № 5. С. 666–669.

- Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.
- Научно-прикладной справочник: Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ / кол. авт. под ред. В.Ю. Георгиевского. М.: ООО "РПЦ Офорт", 2017. 132 с. [http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/block\\_vodohranilishe-190717.pdf](http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/block_vodohranilishe-190717.pdf) (дата обращения 13.01.2022).
- О'Келли Дж. Фосфорное питание водорослей // Фосфор в окружающей среде. М.: Мир, 1977. С. 482–489.
- Павлейчик В.М., Сивохин Ж.Т. Формирование качества поверхностных вод бассейна верхнего течения реки Урал в условиях техногенной трансформации природной среды // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 456–467.
- Сабылина А.В., Лозовик П.А., Зобков М.Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 6. С. 717–729.
- Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилев А.А. Изменение водного режима рек бассейна реки Урал // ДАН. 2019. Т. 488. № 5. С. 545–549.
- Скопинцев Б.А., Гончарова И.А. Использование значимых отношений различных показателей органического вещества природных вод для его качественной оценки // Современные проблемы региональной и прикладной гидрохимии. Л.: Наука, 1987. С. 95–117.
- Соловьев Г.Н., Раимова Е.К., Осадчая Н.Д., Фабарисова Л.Г., Никитина Л.П. Гидробиологическая характеристика Ириклинского водохранилища. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 178 с.
- Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. М.: РАН, 2018. 456 с.
- Черенкова Е.А., Сидорова М.В. Оценка современных условий недостаточного увлажнения, влияющих на маловодность в бассейнах крупных рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 260–269.
- Чибилев А.А., Павлейчик В.М., Дамрин А.Г. Ириклинское водохранилище: геоэкология и природно-ресурсный потенциал. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 183 с.
- Шашуловская Е.А., Мосияш С.А. Некоторые подходы к оценке экологического состояния разнотипных водохранилищ на основе взаимосвязи основных гидрохимических параметров // Поволж. экол. журн. 2019. № 3. С. 371–383.
- Шашуловская Е.А., Мосияш С.А. Особенности минерального состава воды Ириклинского водохранилища и прилегающих участков р. Урал / Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: Сб. материалов VII Всерос. конф. по водной экотоксикологии, посвященной памяти д.б.н., проф. Б. А. Флерова. Ярославль: Филигрань, 2020. С. 227–230.
- Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Филимонова И.Г., Гришина Л.В., Кузина Е.Г. Формирование гидрохимического режима верхнего течения р. Урал в условиях техногенного регулирования стока // Поволж. экол. журн. 2017. № 4. С. 417–425.
- Alimov A.F., Golubkov M.S. Lake eutrophication and community structure // Inland Wat. Biol. 2014. Vol. 7. № 3. P. 185–191.
- Bastidas Navarro M.A., Modenutti B.E. Precipitation patterns, dissolved organic matter and changes in the plankton assemblage in Lake Escondido (Patagonia, Argentina) // Hydrobiologia. 2012. Vol. 691. P. 189–202. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1073-5>
- Bjorneras C., Weyhenmeyer G.A., Evans C.D. et al. Widespread increases in iron concentration in European and North American freshwaters // Global Biogeochem. Cycles. 2017. Vol. 31. Is. 10. P. 1488–1500.
- Boström B., Andersen J.M., Fleischer S., Jansson M. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface // Hydrobiologia. 1988. Vol. 170. P. 229–244. <https://doi.org/10.1007/BF00024907>
- Carvalho L., McDonald C., de Hoyos C. et al. Sustaining recreational quality of European lakes: minimizing the health risks from algal blooms through phosphorus control // J. of Appl. Ecol. 2013. Vol. 50. P. 315–323.
- Chou Q., Nielsen A., Andersen T.K. et al. The impacts of extreme climate on summer-stratified temperate lakes: Lake Søholm, Denmark, as an example // Hydrobiologia. 2021. Vol. 848. P. 3521–3537. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04607-9>
- Datsenko Y.S., Puklakov V.V. Model Assessment of the Mozhaik Reservoir Impact on the Transformation of Organic Matter Flow // Russ. Meteorol. Hydrol. 2020. Vol. 45. P. 579–586. <https://doi.org/10.3103/S1068373920080099>
- Doig L.E., North R.L., Hudson J.J., Hewlett C., Lindenschmidt K.-E., Liber K. Phosphorus release from sediments in a river-valley reservoir in the northern Great Plains of North America // Hydrobiologia. 2017. Vol. 787. P. 323–339. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2977-2>
- Höök T.O., Foley C.J., Collingsworth P., Dorwor L., Fisher B., Hoverman J.T., LaRue E., Pyron M., Tank J. An assessment of the potential impacts of climate change on freshwater habitats and biota of Indiana, USA // Clim. Change. 2020. Vol. 163. Is. 4. P. 1897–1916.
- Kokorite I., Klavins M., Rodinov V. et al. Trends of natural organic matter concentrations in river waters of Latvia // Environ. Monit. Assess. 2012. Vol. 184. P. 4999–5008. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2315-0>
- Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A., Dalechina I.N. Long-Term Changes in the Main Indicators of the Trophic State of the Large Plain Reservoir under the Influence of Climatic Transformation and Successional Processes // Inland Wat. Biol. 2021. Vol. 14. № 6. P. 627–637. <https://doi.org/10.1134/S1995082921060110>
- Søndergaard M., Jensen J.P., Jeppesen E. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes // Hydrobiologia. 1999. Vol. 408 (409). P. 145–152.
- Veraart A.J., De Klein J.J., Scheffer M. Warming can boost denitrification disproportionately due to altered oxygen dynamics // PLoS One. 2011. Vol. 6. Is. 3. P. e18508.

Weyhenmeyer G.A., Müller R.A., Norman M. et al. Sensitivity of freshwaters to browning in response to future climate

change // *Clim. Change*. 2016. Vol. 134. P. 225–239. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1514-z>

## Spatio-Temporal Variability of Hydrochemical Parameters of the Irikliinskii Reservoir in Modern Conditions

E. A. Shashulovskaya<sup>1</sup>, \* and S. A. Mosiyash<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Saratov, Russia*

\*e-mail: [shash.elena2010@yandex.ru](mailto:shash.elena2010@yandex.ru)

The changes in the total mineralization, the content of organic matter and nutrients in the water of the largest Irikliinskii reservoir on the Ural River in 2010–2019 are shown. An analysis of the dynamics of surface air temperature and precipitation on the territory of the Orenburg oblast was carried out. The increase in winter temperatures contributed to the redistribution of the intra-annual water inflow to the artificial reservoir. Over the past decade, its share in the winter period has significantly increased by almost 2 times (from 6 to 15%), and during the flood, on the contrary, a slight downward trend was observed. Changes in the components of the water balance led to an increase in mineralization due to an increase in the content of sulfates, hydrocarbonates and the amount of alkaline elements. The decrease in the amount of precipitation in the region at the beginning of the 21st century was the likely reason for the decrease in the volume of spring floods and, as a result, the decrease in the concentrations of allochthonous organic matter, ammonium nitrogen, and silicon. The dynamics of mineral nitrogen largely depended on water content, and the dominant source in the genesis of phosphates was, obviously, intra-water processes. The iron concentration was determined by the magnitude of the flood inflow. The spatial dynamics of the ingredients is due to the morphometric features of the reservoir. The highest concentrations are noted in the upper reaches. The decrease in the content of the main hydrochemical components in the deep-water lower reaches as a result of intra-water processes indicates a high self-cleaning capacity of the reservoir. The results obtained can supplement the already known data on the functioning of aquatic ecosystems in different geographic zones under current conditions of climate change.

**Keywords:** Irikliinskii Reservoir, climate change, water inflow, mineralization, organic matter, biogenic elements

### REFERENCES

- Alimov A.F., Golubkov M.S. Lake eutrophication and community structure. *Inland Water Biology*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 185–191. (In Russ.).
- Balabanova Z.M. Hydrochemical characteristics of the Irikliinskoe reservoir. *Tr. Ural. Otd. Sib. Nauchno-Issled. Instit. Rybn. Khozyaistva*, 1971, no. 8, pp. 27–46. (In Russ.).
- Bastidas Navarro M.A., Modenutti B.E. Precipitation patterns, dissolved organic matter and changes in the plankton assemblage in Lake Escondido (Patagonia, Argentina). *Hydrobiologia*, 2012, vol. 691, pp. 189–202. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1073-5>
- Bjorneras C., Weyhenmeyer G.A., Evans C.D. et al. Widespread increases in iron concentration in European and North American freshwaters. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2017, vol. 31, pp. 1488–1500.
- Boström B., Andersen J.M., Fleischer S., Jansson M. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface. *Hydrobiol.*, 1988, vol. 170, pp. 229–244. <https://doi.org/10.1007/BF00024907>
- Carvalho L., McDonald C., de Hoyos C. et al. Sustaining recreational quality of European lakes: minimizing the health risks from algal blooms through phosphorus control. *J. Appl. Ecol.*, 2013, vol. 50, pp. 315–323.
- Cherenkova E.A., Sidorova M.V. Assessment of modern conditions of insufficient moisture, affecting low water content in the basins of large rivers of the European part of Russia. *Vodn. Resur.*, 2021, vol. 48, no. 3, pp. 260–269. (In Russ.).
- Chibilev A.A., Pavleichik V.M., Damrin A.G. *Irikliinskoe vodokhranilishche: geoekologiya i prirodno-resursnyi potentsial* [Irikliinskoe Reservoir: Geocology and Natural Resource Potential]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006. 183 p.
- Chou Q., Nielsen A., Andersen T.K. et al. The impacts of extreme climate on summer-stratified temperate lakes: Lake Søholm, Denmark, as an example. *Hydrobiol.*, 2021, vol. 848, pp. 3521–3537. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04607-9>
- Datsenko Y.S., Puklakov V.V. Model assessment of the Mozhaisk reservoir impact on the transformation of organic matter flow. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 579–586. <https://doi.org/10.3103/S1068373920080099>
- Dmitrieva V.A., Nefedova E.G. Hydrological response to changing climatic conditions and anthropogenic activities in the Upper Don basin. *Vopr. Geogr.*, 2018, vol. 145, pp. 285–297. (In Russ.).
- Doig L.E., North R.L., Hudson J.J., Hewlett C., Lindenschmidt K.-E., Liber K. Phosphorus release from sediments in a river-valley reservoir in the northern Great Plains of North America. *Hydrobiol.*, 2017, vol. 787, pp. 323–339. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2977-2>



- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2019 god* [Report on Climate Features in the Territory of the Russian Federation for 2019]. Moscow, 2020. 97 p.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Telegina E.A. Changes in the winter runoff of rivers in the European part of Russia. *Vodn. Resur.*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 581–588. (In Russ.).
- Georgievskii V.Yu. Water resources of the Russian Federation in a changing climate. In *Gidrometeorologiya i ekologiya: trudy II Vserossiiskoi konferentsii* [Hydrometeorology and Ecology: Proceedings of the II All-Russian Conference]. 2018, pp. 169–171. (In Russ.).
- Höök T.O., Foley C.J., Collingsworth P., Dorwor L., Fisher B., Hoverman J.T., LaRue E., Pyron M., Tank J. An assessment of the potential impacts of climate change on freshwater habitats and biota of Indiana, USA. *Climatic Change*, 2020, vol. 163, pp. 1897–1916.
- Kalinkina, N.M., Filatov, N.N., Tekanova, E.V., Balaganskii A.F. Long-term dynamics of the runoff of iron and phosphorus into Lake Onega with the waters of the Shuya River in the conditions of climatic changes. *Reg. Ekol.*, 2018, no. 2, pp. 65–73. (In Russ.).
- Kambalina M.G., Skvortsova L.N., Mazurova I.S., Guseva N.V., Bakibaev A.A. Investigation of the forms of silicon in natural waters with a high content of dissolved organic substances. *Izv. Tomsk. Politekh. Univ. Khimiya i Khimicheskie Tekhnologii*, 2014, vol. 325, pp. 64–70. (In Russ.).
- Kirpichnikova N.V., Lapina E.E., Kudryashova V.V. Long-term dynamics of nitrogen and phosphorus content in groundwater of the catchment area of the Ivankovo reservoir. *Vodn. Resur.*, 2020, vol. 47, no. 5, pp. 536–545. (In Russ.).
- Kokorite I., Klavins M., Rodinov V. et al. Trends of natural organic matter concentrations in river waters of Latvia. *Environ. Monit. Assess.*, 2012, vol. 184, pp. 4999–5008. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2315-0>
- Korneva L.G., Lazareva V.I., Mineeva N.M., Sigareva L.E., Sokolova E.A., Timofeeva N.A., Mitropol'skaya I.V., Solov'eva V.V. The state and dynamics of biological communities of the Rybinsk reservoir under the conditions of climate change. *Zh. Sib. Fed. Univ., Ser. Biol.*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 160–179. (In Russ.).
- Lazareva V.I., Stepanova I.E., Tsvetkov A.I., Pryanichnikova E.G., Perova S.N. Oxygen regime of the Volga and Kama reservoirs during the period of climate warming: consequences for zooplankton and zoobenthos. *Tr. Inst. Biol. Vnutrennikh Vod im. I.D. Papanina RAN*, 2018, no. 81 (84), pp. 47–84. (In Russ.).
- Linnik P.M. Climatic changes as an important factor in the formation of the chemical composition of surface waters in modern conditions (review). *Gidrobiol. Zh.*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 87–106. (In Ukr.).
- Martynova M.V. Influence of the chemical composition of bottom sediments on the internal phosphorus load. *Vodn. Resur.*, 2008, no. 3, pp. 358–363. (In Russ.).
- Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Khoroshavin V.Yu. Forecast of the impact of possible climate warming on the chemical composition of land waters. *Dokl. Akad. Nauk*, 2011, vol. 441, no. 5, pp. 666–669. (In Russ.).
- Nauchno-prikladnoi spravochnik: Mnogoletnie kharakteristiki pritoka vody v krupneishie vodokhranilishcha RF* [Scientific and Applied Handbook: Long-Term Characteristics of Water Inflow into the Largest Reservoirs of the Russian Federation]. Georgievskii V.Yu., Ed. Moscow: Ofort Publ., 2017. [http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/block\\_vodokhranilishche-190717.pdf](http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/block_vodokhranilishche-190717.pdf)
- Nauchno-prikladnoi spravochnik: Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii* [Scientific and Applied Handbook: Long-Term Fluctuations and Variability of Water Resources and the Main Characteristics of the Flow of Rivers in the Russian Federation]. St. Petersburg: RIAL Publ., 2021. 190 p.
- O'Kelly J. Phosphorus nutrition of algae. In *Fosfor v okruzhayushchei srede* [Phosphorus in the Environment]. Moscow: Mir Publ., 1977, pp. 482–489. (In Russ.).
- Pavleichik V.M., Sivokhip Zh.T. Formation of the quality of surface waters in the basin of the upper reaches of the Ural River in the conditions of technogenic transformation of the natural environment. *Vodn. Resur.*, 2013, vol. 40, no. 5, pp. 456–467. (In Russ.).
- Sabylina A.V., Lozovik P.A., Zobkov M.B. Chemical composition of the water of Lake Onega and its tributaries. *Vodn. Resur.*, 2010, vol. 37, no. 6, pp. 717–729. (In Russ.).
- Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A. Features of the mineral composition of the water of the Irikliinskii reservoir and adjacent sections of the Ural River. In *Mat. VII Vseross. konf. po vodnoi ekotoksikologii, posvyashchennoi pamyati d.b.n., prof. B. A. Flerova "Antropogennoe vliyaniye na vodnye organizmy i ekosistemy"* [Proc. VII All-Russ. Conf. on Aquatic Ecotoxicology, Dedicated to the Memory of Doctor of Biological Sciences, prof. B.A. Flerov "Anthropogenic Impact on Aquatic Organisms and Ecosystems"]. Yaroslavl: Filigree Publ., 2020, pp. 227–230. (In Russ.).
- Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A. Some approaches to assessing the ecological state of different types of reservoirs based on the relationship of the main hydrochemical parameters. *Povolzhskii Ekol. Zh.*, 2019, no. 3, pp. 371–383. (In Russ.).
- Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A., Dalechina I.N. Long-term changes in the main indicators of the trophic state of the large plain reservoir under the influence of climatic transformation and succession processes. *Inland Water Biol.*, 2021, no. 6, pp. 627–637.
- Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A., Filimonova I.G., Grishina L.V., Kuzina E.G. Formation of the hydrochemical regime of the upper reaches of the Ural River in the conditions of technogenic flow regulation. *Povolzhskii Ekol. Zh.*, 2017, no. 4, pp. 417–425. (In Russ.).
- Sivokhip Zh.T., Pavleichik V.M., Chibilev A.A. Changes in the water regime of rivers in the Ural basin. *Dokl. Akad. Nauk*, 2019, vol. 488, no. 5, pp. 545–549. (In Russ.).
- Skopintsev B.A., Goncharova I.A. Using the values of the ratios of various indicators of the organic matter of natural waters for its qualitative assessment. In *Sovremennyye problemy regional'noi i prikladnoi gidrokhimii* [Modern Problems of Regional and Applied Hydrochemistry]. Leningrad: Nauka Publ., 1987, pp. 95–117. (In Russ.).
- Solovykh G.N., Raimova E.K., Osadchaya N.D., Fabarisova L.G., Nikitina L.P. *Gidrobiologicheskaya kharakteristika Irikliinskogo vodokhranilishcha* [Hydrobiologi-

- cal Characteristics of the Irikliinskii Reservoir]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2003. 178 p.
- Søndergaard M., Jensen J.P., Jeppesen E. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes. *Hydrobiol.*, 1999, vol. 408, pp. 145–152.
- Struktura i funktsionirovanie ekosistemy Rybinskogo vodokhranilishcha v nachale XXI veka* [Structure and Functioning of the Ecosystem of the Rybinsk Reservoir at the Beginning of the 21st Century]. Moscow: Ross. Akad. Nauk, 2018. 145 p.
- Vasil'ev D.Yu., Vodop'yanov V.V., Semenov V.A., Chibilev A.A. Assessment of trends in aridity for the territory of the Southern Urals in the period 1960–2019 using various methods. *Dokl. RAN. Nauki o Zemle*, 2020, vol. 494, pp. 91–96. (In Russ.).
- Veraart A.J., De Klein J.J., Scheffer M. Warming can boost denitrification disproportionately due to altered oxygen dynamics. *PLoS One*, 2011, vol. 6, no. 3, e18508.
- Vishnevskii V.I. Hydrological and hydrochemical regime of Dnieper water storage facilities. *Gidrobiol. Zh.*, 2020, no. 2, pp. 103–120. (In Russ.).
- Weyhenmeyer G.A., Müller R.A., Norman M. et al. Sensitivity of freshwaters to browning in response to future climate change. *Climatic Change*, 2016, vol. 134, pp. 225–239.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-015-1514-z>
- Zhezherya VA, Zhezherya T.P., and Linnik P.M. Nutrients in the water of reservoirs of the Dnieper cascade after regulation of the Dnieper runoff. *Gidrobiol. Zh.*, 2021, no. 6, pp. 89–109. (In Ukr.).