



Пространственная и сезонная изменчивость содержания железа в воде Бурейского водохранилища

Владимир Павлович ШЕСТЕРКИН¹
кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник
shesterkin@ivep.as.khb.ru, orcid 0000-0002-7271-8228

Нина Михайловна ШЕСТЕРКИНА²
научный сотрудник
shesterkina@ivep.as.khb.ru, orcid 0000-0001-7053-6087

^{1,2}ХФИЦ Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. Работа посвящена изучению пространственной и сезонной изменчивости содержания валового и растворенного железа в воде Бурейского водохранилища. Приводятся результаты гидрохимических исследований на водоеме за 20-летний период эксплуатации. Отмечено, что в начале заполнения водохранилища содержание железа формировалось в условиях высокого водного обмена и влияния стока питающих его рек, дренирующих преимущественно заболоченные земли Тырминской и Верхнебурейнской равнин. Наибольшие концентрации валового железа из-за влияния внутриводоемных процессов (вынос из затопленных почв и растительности, появление дефицита растворенного кислорода и др.) в период наполнения были зафиксированы в зимний период в придонных слоях воды Приплотинного, Тырминского и Мельгинского участков. Максимальное содержание валового железа (4.2 мг/дм^3) было установлено в июле засушливого 2008 г. Показано, что повышенный приток воды и стабилизация уровня воды в водохранилище на отметке НПУ (256 м) обусловили после 2009 г. улучшение кислородного режима, которое привело к снижению концентрации растворенного железа. Отмечены небольшие различия в содержании валового и растворенного железа в поверхностных слоях воды в районе оползня в январе и июле 2019 г. Установлено появление высоких концентраций валового (3.46 мг/дм^3) и растворенного (0.72 мг/дм^3) железа зимой 2022 г. в верхней части водохранилища после значительного притока воды в июле–августе 2021 г. (21.2 км^3). Показана стабилизация содержания растворенного железа в пределах $0.1\text{--}0.2 \text{ мг/дм}^3$ в поверхностных слоях воды в многоводные 2021–2022 гг. Дана оценка стока валового и растворенного железа зимой 2021/2022 г.

Ключевые слова: Бурейское водохранилище, водный обмен, содержание, железо

Для цитирования: Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Пространственная и сезонная изменчивость содержания железа в воде Бурейского водохранилища // Тихоокеанская география. 2023. № 4. С. 29–37. https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_3. EDN: KSYENK.

Spatial and seasonal variability of iron content in the waters of the Bureya Reservoir

Vladimir P. SHESTERKIN¹

Candidate of Geographical Sciences, Leading research associate
shesterkin@ivep.as.khb.ru, orcid 0000-0002-7271-8228

Nina M. SHESTERKINA²

Research associate
shesterkina@ivep.as.khb.ru, orcid 0000-0001-7053-6087.

^{1,2}KhFRC Institute of Water Ecological Problems FEB RAS, Khabarovsk, Russia

Abstract. The paper is devoted to the study of spatial and seasonal variability of gross and dissolved iron content in the waters of the Bureya Reservoir. The results of hydrochemical studies in the reservoir are given over a 20-year period of its exploitation. At the beginning of the filling of the reservoir, the iron content was formed under conditions of high water exchange and the influence of the flow of the rivers feeding it, draining mainly the swampy lands of Tirminskaya and Verkhnebureinskaya plains. The highest concentrations of gross iron, due to the influence of water bodies inner processes (removal from flooded soils and vegetation, appearance of dissolved oxygen deficit, etc.), during the filling period were recorded in the winter period in the bottom water layers at the Priplotinnoe, Tyrma and Melginskoe sites. The maximum gross iron content (4.2 mg/dm³) was found in July of the dry year 2008. It is shown that the increased inflow of water and stabilization of the water level in the reservoir at the level of the normal retaining level (256 m) caused the improvement of the oxygen regime after 2009, which led to a decrease in the concentration of dissolved iron. Small differences in gross and dissolved iron concentrations in surface waters in the landslide area in January and July 2019 were observed. The occurrence of high concentrations of total (3.46 mg/dm³) and dissolved (0.72 mg/dm³) iron in winter 2022 in the upper part of the reservoir after a significant inflow in July-August of 2021 (21.2 km³) was recorded. Stabilization of the dissolved iron content in the surface water layers occurred during high-water years 2021–2022 in the range of 0.1–0.2 mg/dm³. Estimation of gross and dissolved iron runoff in winter of 2021–2022 is given.

Keywords: Bureya Reservoir, water exchange, content, iron

For citation: Shesterkin V.P., Shesterkina N.M. Spatial and seasonal variability of iron content in the waters of the Bureya Reservoir. *Pacific Geography*. 2023;(4)29-37. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_3.

Введение

В последние десятилетия в бассейне р. Амур активно развивается гидротехническое строительство. Наибольшее количество водохранилищ для водоснабжения, энергетики и орошения создано на китайской части бассейна (Сунхуаху, Байшань и др.). На российской части появились Зейское, Бурейское и Нижнебурейское водохранилища, полный объем которых суммарно превышает 1/3 годового стока р. Амур.

Формирование химического состава воды в водохранилищах – это сложный и многогранный процесс, зависящий от комплекса разнообразных факторов, связанных как с функционированием водных экосистем, так и с природными условиями водосбора. На него оказывают влияние многие абиотические, биологические и антропогенные факторы. В природных условиях они действуют в сложной зависимости и взаимосвязи, определяя трансформацию основных химических веществ [1]. Среди этих веществ большое значение имеет железо – широко распространенный элемент земной коры, принимающий

активное участие в биохимических процессах в живых организмах, лимитирующий качество и продуктивность водных объектов. Сделано предположение о снижении продуктивности Охотского моря вследствие уменьшения стока железа в р. Амур [2], отмечены рост и последующий спад стока железа в р. Амур в конце XX в. из-за деградации многолетней мерзлоты вблизи южной границы ее распространения [3], установлен повышенный сток железа в водотоках криолитозоны бассейна р. Буряя [4].

В воде рек и озер железо находится в растворенном, взвешенном и коллоидном состояниях. К взвешенной форме принято относить частицы размером более 0.45 мкм, представляющие собой железосодержащие минералы и сорбированные на взвеси соединения железа. Растворенное железо может находиться в ионной форме, в виде комплексных соединений с минеральными и органическими веществами. На формы железа и их содержание влияют значения pH и Eh, концентрации O₂, H₂S, CO₂, органических кислот. Предельно допустимая концентрация суммарного содержания растворенных форм железа (Fe_{раст.}) в воде объектов рыбохозяйственного значения составляет 0.1 мг/дм³ [5]. Под валовым содержанием подразумевают суммарное содержание в воде растворенных и взвешенных форм железа (Fe_{вал.}).

ИВЭП ДВО РАН осуществлял мониторинг за содержанием железа в воде Бурейского водохранилища в период его наполнения в 2003–2008 гг. и после схода оползня в районе его расположения в 2019–2020 гг. В многоводные 2021–2022 гг. появились новые данные о содержании валового и растворенного железа в воде этого водохранилища, которые позволили рассмотреть его динамику за 20-летний период эксплуатации.

Объект и методы исследований

Основным объектом исследования являлось Бурейское водохранилище – второе после Зейского крупное водохранилище в Приамурье. Плотина Бурейской ГЭС расположена в 186 км выше устья р. Буряя. Площадь водосбора и зеркала составляют 64 800 и 750 км² соответственно, полный объем при нормальном подпорном уровне (НПУ) 256 м – 20.9 км³. Основные притоки – рр. Буряя и Тирма. Параметры Бурейского водохранилища в 2009–2022 гг. даны в табл. 1.

Таблица 1
Распределение компонентов водного баланса в Бурейском водохранилище в 2009–2022 гг., км³

Table 1. Distribution of water balance components in the Bureya Reservoir in 2009–2022, km³

Компоненты водного баланса	Год														
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Приток	34.1	29.5	20.4	32.8	38.2	21.9	24.6	37.1	28.3	27.3	41.9	32.4	41.3	40.5	
Расход (XII–III)	6.1	8.2	7.5	7.3	5.8	7.9	6.3	8.4	7.8	8.5	8.5	8.4	8.7	9.1	
Расход (IV–XI)	15.1	15.0	14.0	22.9	30.3	15.8	16.0	30.2	16.6	18.8	34.0	23.1	32.4	31.8	

Мониторинг проводили в 2003–2022 гг. на 12 станциях, расположенных на определенных участках (рис. 1). Летом и осенью 2003–2007, в марте 2004–2007 и июле 2011 гг. отбор проб воды (общее количество составило 343) осуществляли на Чеугдинском и Приплотинном участках на 3 равномерно расположенных по ширине водоема вертикалях, на Сектаглинском, Тырминском и Нижнемельгинском участках – на середине водоема. Пробы воды отбирали с поверхности, среднего и нижнего горизонтов. В 2008 г. исследования проводили на Приплотинном участке, в марте, июне, августе и октябре охватывали Бурейский, Верхнетырминский, Ольский и Чекундинский участки, общее количество проб составило 99. В январе и июле 2019 г., июле 2020 г. воду отбирали с поверхности в районе оползня на Сандарском участке (20 проб воды). В сентябре 2021 г., марте и июле 2022 г. пробы воды отбирали в поверхностных и придонных слоях воды на всей акватории водохранилища (общее количество проб составило 55).

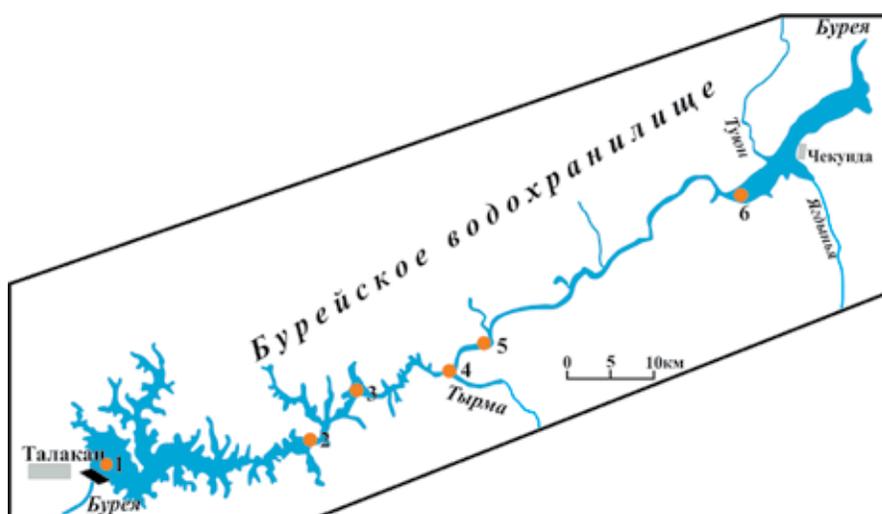


Рис. 1. Карта-схема Бурейского водохранилища: 1 – Приплотинный; 2 – Чеугдинский; 3 – Мальмалтинский; 4 – Сектаглинский; 5 – Тырминский; 6 – Нижнетырминский; 7 – Нижнемельгинский; 8 – Сандарский; 9 – Солдатов; 10 – Ольский; 11 – Чекундинский; 12 – Бурейский участки

Fig. 1. Map-diagram of the Bureya Reservoir sites: 1 – Priplotinny; 2 – Cheugdinsky; 3 – Malmaltinsky; 4 – Sektaglinsky; 5 – Tyrminsky; 6 – Nizhnetyrminsky; 7 – Nizhnelmginsky; 8 – Sandarsky; 9 – Soldatov; 10 – Olsky; 11 – Chekundinsky; 12 – Bureysky sites

Содержание железа определяли в Центре коллективного пользования при ИВЭП ДВО РАН: $Fe_{\text{вал}}$ без фильтрации, $Fe_{\text{раств.}}$ – после фильтрации через фильтр (0.45 мкм) по [6]. В 2003–2008, 2010 гг. определяли преимущественно $Fe_{\text{вал}}$, в 2011, 2020 и 2021 гг. – $Fe_{\text{раств.}}$, в 2019 и 2022 гг. $Fe_{\text{вал}}$ и $Fe_{\text{раств.}}$ одновременно. В работе использовали материалы ПАО «Рус-Гидро» за 2003–2022 гг. и Росгидромета за 1949–1988 гг. для характеристики р. Бурей за регулирования.

Результаты и обсуждение

Вода р. Бурей характеризуется гидрокарбонатно-кальциевым составом, низкой минерализацией. До зарегулирования, в 1949–1988 гг., минерализация варьировала от 15.4 до 112.2 мг/дм³. Наименьшие значения отмечались в 1960, 1961 и 1972 гг. в период крупных паводков. В летнюю межень минерализация повышалась на 10–15 мг/дм³, зимой в среднем составляла 61.9 мг/дм³ [7].

Содержание $Fe_{\text{вал}}$ изменялось в широком диапазоне. В зимнюю межень в 1949–1980 гг. значение находилось в пределах 0.01–0.29 мг/дм³, в среднем составляло 0.17 мг/дм³. Сток изменялся в пределах 42–1477 кг/сут, в среднем составлял 0.6 т/сут. В половодье и паводки его содержание возрастало до 1.63 мг/дм³ за счет повышения содержания взвешенных веществ (в 1978 г. до 1408 мг/дм³). Сток $Fe_{\text{вал}}$ в период открытого русла в среднем составлял 23 т/сут [8].

Заполнение водохранилища началось в апреле 2003 г. В начальный его период качество вод формировалось в условиях высокого водного обмена. В 2004, 2009, 2010, 2012, 2013, 2016–2022 гг. приток воды в водоем был выше среднемноголетнего значения (27.3 км³), причем в 2019 г. был максимальным (см. табл. 1). Наименьший приток воды (17.8 км³) отмечался в 2008 г. Холостой сброс воды во время строительства и ввода в действие гидроагрегатов проводился через нижние затворы на отметках в соответствии с проектом. Такие особенности заполнения, связанные с выработкой электроэнергии, снизили влияние затопленных почв и растительности на качество воды.

Во время наполнения водохранилища основное влияние на содержание железа оказал сток питающих его рек, затопленные леса и мари. В дальнейшем его содержание в отсутствие хозяйственного освоения береговой зоны и слабого освоения в бассейнах притоков определялось стоком питающих рек и внутриводоёмными процессами [8].

Содержание $Fe_{вал.}$ в воде в начале существования водохранилища было повышенным из-за высокого водного обмена и поступления из затопленных почв и растительности (табл. 2). Наибольшая концентрация наблюдалась в начале лета в придонных слоях воды Приплотинного участка (рис. 2), когда в питании водохранилища преобладали талые снеговые воды [8]. По сравнению с верхними слоями содержание $Fe_{вал.}$ в придонных слоях было выше на 0.26 мг/дм^3 . По мере наполнения водоема его содержание постепенно снижалось, сглаживались и различия по глубине.

Таблица 2

Содержание $Fe_{вал.}$ и $Fe_{раств.}$ в воде Бурейского водохранилища, мг/дм^3
Table 2. $Fe_{tot.}$ and $Fe_{dis.}$ contents in the waters of the Bureya Reservoir, mg/dm^3

2003 г. n=90	2004 г. n=111	2005 г. n=86	2006 г. n=63	2007 г. n=54	2008 г. n=99	2010 г. n=9	2019 г. n=11	2022 г. n=38
$Fe_{вал.}$								
0.34 ± 0.10 0.18–0.59	0.26 ± 0.09 0.12–0.76	0.28 ± 0.19 0.11–1.24	0.39 ± 0.45 0.11–2.64	0.34 ± 0.15 0.19–1.16	0.39 ± 0.46 0.13–4.20	0.29 ± 0.08 0.19–0.43	0.14 ± 0.02 0.11–0.17	0.46 ± 0.58 0.11–3.46
$Fe_{раств.}$								
2011 г. n=22	2019 г. n=11	2020 г. n=9	2021 г. n=16	2022 г. n=38				
0.18 ± 0.08 0.06–0.36	0.08 ± 0.02 0.05–0.11	0.15 ± 0.02 0.13–0.19	0.20 ± 0.05 0.13–0.30	0.21 ± 0.12 0.08–0.72				

Примечание. Числитель – среднее и среднее квадратичное отклонение, знаменатель – минимальное и максимальное значения; n – количество проб (the numerator is the mean and standard deviation, the denominator is the minimum and maximum values; n – is the number of samples).

На второй год эксплуатации водохранилища содержание $Fe_{вал.}$ стало варьировать в более широких пределах (см. табл. 2), среднее значение зимой составило 0.21 мг/дм^3 , что было незначительно выше, чем до зарегулирования. Наибольшие различия по глубине (от 0.18 до 0.76 мг/дм^3) отмечались зимой на Приплотинном участке. На остальных участках амплитуда колебаний была ниже 0.12 мг/дм^3 . Летом и осенью при высоком водном обмене (приток составлял 30.6 км^3 , максимальный объем – 6.8 км^3) содержание $Fe_{вал.}$ в воде изменялось в основном в более узком диапазоне (0.24 – 0.34 мг/дм^3).

В последующие маловодные годы (приток воды был ниже 24.9 км^3) на содержание $Fe_{вал.}$ начинают все больше влиять затопленные почвы и растительность. В марте 2005 г. наибольшие значения наблюдались в нижних слоях воды как у плотины (рис. 2), так и на Тырминском (до 1.1 мг/дм^3) и Мельгинском (до 1.2 мг/дм^3) участках.

Существенные изменения в его содержании отмечались после паводков. Большой приток объемом 7.6 км^3 в июне 2005 г. не только обусловил полную смену воды в водохранилище, но и вызвал повышение содержания $Fe_{вал.}$ в придонном слое в июле.

На Чеугдинском и Тырминском участках оно достигало 0.59 мг/дм^3 . В верхних слоях воды содержание $Fe_{вал.}$ было ниже 0.2 мг/дм^3 [9]. Различия в содержании между верхними и нижними слоями на Нижнемельгинском участке составляло 0.08 мг/дм^3 , Сектаглинском – 0.06 мг/дм^3 . Осенью постепенное снижение притока воды в водохранилище обусловило снижение и выравнивание концентрации $Fe_{вал.}$ по глубине.

Содержание $Fe_{раств.}$ в 2005 г. [10] было повышенным (0.05 – 0.16 мг/дм^3) из-за обширных заболоченных территорий, определяющих образование устойчивых Fe-органических комплексов (в основном коллоидов). Более высокое содержание $Fe_{раств.}$ в придонных слоях по сравнению с поверхностными могло быть вызвано увеличением содержания тонкодисперсных частиц.

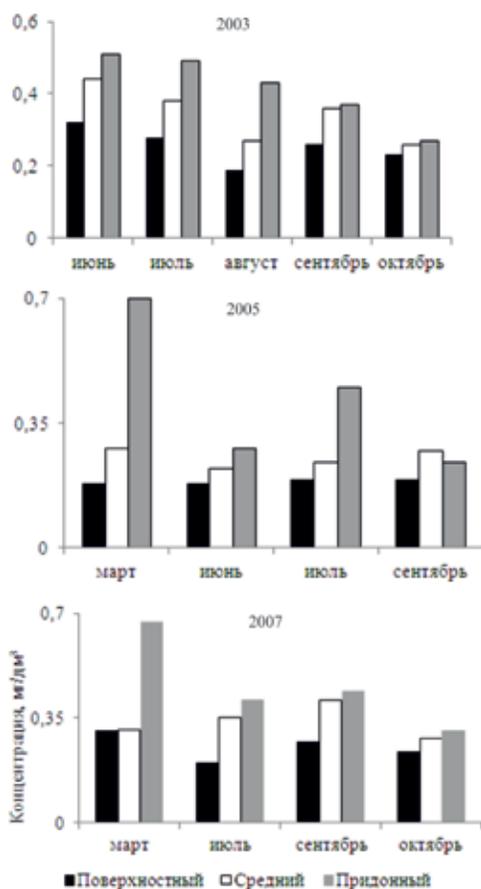


Рис. 2. Сезонная динамика распределения содержания $Fe_{вал}$ по глубине в воде Приплотинного участка Бурейского водохранилища в 2003, 2005 и 2007 гг.

Fig. 2. Seasonal dynamics of the Fe_{tot} depth distribution in the waters of the Bureya Reservoir at the Priplotinnoe site in 2003, 2005 and 2007

его содержание на всех участках изменялось в пределах 0.19–0.28 мг/дм³, в средних – 0.35–0.43 мг/дм³, по длине и глубине водоема различалось незначительно из-за большого притока талых снеговых вод в апреле–мае (5.3 км³). В дальнейшем слабый приток (8 км³) не способствовал поступлению $Fe_{вал}$ в водоем, поэтому его содержание в поверхностных слоях воды находилось в пределах 0.13–0.25 мг/дм³, в средних – 0.19–0.37 мг/дм³ [12]. В придонных слоях воды большинства участков содержание было ниже 0.41 мг/дм³, лишь на Нижнемельгинском участке достигало 2.26 мг/дм³. Среднее содержание $Fe_{вал}$ летом составило 0.26 мг/дм³, сток –12.6 т/сут [8].

В последующие годы из-за улучшения кислородного режима, обусловленного значительным притоком воды и затухания влияния процессов разложения затопленных почв и растительности, содержание железа в воде стало постепенно снижаться (см. табл. 2). Лишь после значительного притока воды в июне–августе 2021 г. (25.6 км³) и превышения НПУ воды в водохранилище на 1.77 м содержание $Fe_{вал}$ в марте 2022 г. достигло в среднем 0.71 мг/дм³, изменялось в пределах 0.25–3.46 мг/дм³. Причем на Приплотинном участке значительные различия в содержании отсутствовали (рис. 3), а максимальное значение наблюдалось в придонном слое воды Чекундинского участка из-за подтопления новых затопленных земель.

Зимой 2006 и 2007 гг. на содержание $Fe_{вал}$ на всех участках водохранилища, кроме Тырминского, начинают влиять внутриводоемные процессы, которые обусловили наибольшие его значения в придонных слоях воды, имеющих дефицит растворенного кислорода (см. рис. 2). Подобное распределение концентраций $Fe_{вал}$ отмечалось и при заполнении Зейского водохранилища, однако его содержание в придонных слоях воды здесь достигало 3.0 мг/дм³ вследствие значительных количеств затопленной древесины [11]. Лишь на Тырминском участке большие различия в содержании $Fe_{вал}$ между верхними и нижними слоями отсутствовали из-за малой глубины (<25 м). Значительно меньше содержалось $Fe_{вал}$ осенью 2006 г. после притока 10 км³ в июле–августе. В придонных слоях воды Приплотинного участка его содержание составляло 0.42 мг/дм³, Нижнемельгинского – 0.22 мг/дм³. В поверхностных горизонтах воды концентрация находилась в пределах 0.11–0.26 мг/дм³ [9].

Сезонная динамика содержания $Fe_{вал}$, отмечавшаяся в начале заполнения, в условиях снижения притока воды в водохранилище в 2006–2007 гг. и затопления больших массивов заболоченных земель в его широкой части сохранялась и в 2008 г., однако в пространственном отношении претерпела существенное изменение. В июне 2008 г. максимальное его содержание (4.2 мг/дм³) отмечалось у плотины на глубине 111 м, где концентрация кислорода была ниже 0.3 мг/дм³. В верхних слоях воды

В конце июля 2022 г. содержание $Fe_{вал.}$ варьировало в более широком диапазоне: в верхних слоях от 0.11 до 0.23 мг/дм³, в нижних – от 0.23 до 0.81 мг/дм³. Максимальные его концентрации отмечались в воде придонных слоев Нижнетырминского и Сандарского участков.

Первые исследования содержания $Fe_{раств.}$ в воде Бурейского водохранилища в конце маловодного июля 2011 г. свидетельствовали о небольших его различиях по акватории и

глубине. В поверхностных слоях воды его содержание было в пределах 0.06–0.14 мг/д. В целом по акватории водоема наименьшее значение отмечалось в верхних слоях воды Сектаглинского и Тырминского участков, наибольшее – в придонных слоях Приплотинного участка (возможно, сформированных в многоводном 2010 г.). Низкие концентрации $Fe_{раств.}$ наблюдались в поверхностных слоях воды Сандарского участка в январе (0.08–0.11 мг/дм³) и июле (0.05–0.07 мг/дм³) многоводного 2019 г. (в середине июля приток достиг 17.8 км³), что свидетельствовало о стабилизации его содержания в этих слоях воды в пределах 0.05–0.11 мг/дм³.

В сентябре многоводного 2021 г. содержание $Fe_{раств.}$ изменялось в узком диапазоне: в поверхностных горизонтах воды от 0.13 до 0.19 мг/дм³, в придонных – от 0.17 до 0.28 мг/дм³. Наибольшие концентрации и различия между этими горизонтами наблюдались на Приплотинном и Ольском участках. На Чекундинском и Сандарском участках различия в содержании были менее 0.03 мг/дм³.

Повышенный приток воды в июле–августе 2021 г. и затопление заболоченных земель обусловили в марте 2022 г. рост содержания $Fe_{раств.}$ (табл. 3) на всех участках водохранилища. В верхних слоях воды его концентрация изменялась от 0.17 до 0.25 мг/дм³, в придонных – от 0.22 до 0.72 мг/дм³. Причем на Приплотинном участке различия в содержании $Fe_{раств.}$ по глубине отсутствовали (см. рис. 3). В воде р. Бурейя содержание $Fe_{раств.}$ достигало 0.14 мг/дм³.

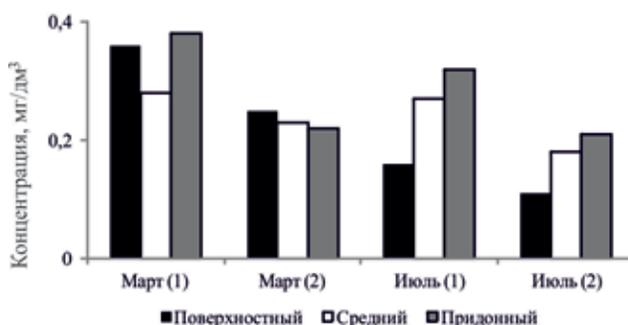


Рис. 3. Распределение содержания $Fe_{вал.}$ (1) и $Fe_{раств.}$ (2) в воде Приплотинного участка Бурейского водохранилища в марте и июле 2022 г.

Fig. 3. The distribution of the $Fe_{tot.}$ (1) and $Fe_{dis.}$ (2) contents in the waters of the Bureya Reservoir at the Priplotinny Site in March and July 2022

Таблица 3
Сезонные изменения содержания $Fe_{вал.}$ и $Fe_{раств.}$ в воде Бурейского водохранилища в 2022 г., мг/дм³

Table 3. Seasonal changes in the content of $Fe_{tot.}$ and $Fe_{dis.}$ in the waters of the Bureya Reservoir in 2022, mg/dm³

$Fe_{вал.}$		$Fe_{раств.}$		$Fe_{раств.}$, % от $Fe_{вал.}$	
март n=16	июль n=22	март n=16	июль n=22	март n=16	июль n=22
0.71 ± 0.82 0.28–3.46	0.28 ± 0.17 0.10–0.81	0.28 ± 0.14 0.13–0.72	0.15 ± 0.05 0.08–0.28	56 ± 19 21–82	61 ± 16 35–100

Примечание. Числитель – среднее и среднеквадратичное отклонение, в знаменателе – минимальное и максимальное значения; n – количество проб (the numerator is the mean and standard deviation, the denominator is the minimum and maximum values; n – is the number of samples).

Повышенное содержание железа наряду с максимальными за весь период эксплуатации водоема расходами воды позволили дать оценку стока $Fe_{раств.}$ и $Fe_{вал.}$ в зимний период,

которые составили соответственно 16.5 и 24.8 т/сут. Таким образом, по сравнению с 1949–1988 гг. [8], зимний сток $Fe_{вал.}$ стал выше в 41.3 раза.

Значительный приток воды (20.4 км³) в мае–июле 2022 г. обусловил смену воды в водоеме, привел к существенному снижению в нем концентрации железа (см. табл. 3). В поверхностных слоях воды концентрация $Fe_{раств.}$ находилась в пределах 0.08–0.11 мг/дм³, в придонных – 0.14–0.28 мг/дм³, в среднем составила 0.15 мг/дм³.

Заключение

Гидрохимические наблюдения в 2003–2022 гг. на Бурейском водохранилище свидетельствуют о больших вариациях содержания железа, вызванных изменениями водного режима и внутриводоемными процессами. В начале заполнения водоема основное влияние на содержание железа оказал высокий водный обмен и сток питающих рек, дренирующих заболоченные земли. Наибольшие концентрации валового железа из-за влияния затопленных почв и растительности отмечались в нижних слоях воды зимой и в июле засушливого 2008 г. В верхних слоях воды концентрация валового железа не превышала 0.2 мг/дм³. Повышенный приток и стабилизация уровня воды на НПУ, а также улучшение кислородного режима привели к снижению содержания железа после 2009 г. В январе и июле 2019 г. исследования показали небольшие различия в содержании валового и растворенного железа в верхних слоях воды в районе оползня.

В многогоднюю зиму 2021/2022 г. отмечены повышенные концентрации валового (3.46 мг/дм³) и растворенного (0.72 мг/дм³) железа в нижних слоях воды Чекундинского участка, стабилизация содержания растворенного железа в пределах 0.05–0.13 мг/дм³ в верхних слоях воды, максимальный сток растворенного (16.5 т/сут) и валового (24.8 т/сут) железа.

Благодарности. Авторы выражают благодарность кандидатам географических наук старшим научным сотрудникам Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН С.Л. Горину и П.Н. Терскому за содействие в отборе проб воды в 2021–2022 гг.

Acknowledgements. The authors are grateful to Cand. geogr. Sciences, Senior Research Fellows of the Institute of Atmospheric Physics. A.M. Obukhov RAS S.L. Gorin and P.N. Tersky for assistance in water sampling in 2021–2022.

Литература

1. Эдельштейн К.К., Белова С.Л., Заславская М.Б., Новикова Е.В. Гидролого-гидрохимические аспекты формирования качества воды в водохранилищах питьевого и рекреационного назначения // Водные ресурсы. 1993. Т. 20, № 5. С. 565–574.
2. Narita H., Shiraiwa T., Nakatsuka T. Human activities in northeastern Asia and their impact on the biological productivity in north Pacific Ocean // Report on Amur-Okhotsk project. Kyoto: RIHN. 2004. N 2. P. 1–24.
3. Шапов В.В., Кулаков В.В., Ониши Т. Аномальная динамика железа в реках системы Амура в конце XX века: вероятные причины // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. 2008. № 10. С. 72–78.
4. Tashiro Y., Yoh M., Shiraiwa T., Onishi T., Shesterkin V., Kim V. Seasonal variations of dissolved iron concentration in active layer and permafrost areas, Russian Far East // Water. 2020. Vol. 12, N 9. 2500.
5. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». М.: Минюст России, 2017. № 45203. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006> (дата обращения: 23.10.2023).
6. РД 52.24.358-2019. Массовая концентрация железа общего и железа валового в водах. Методика измерений фотометрическим методом с 1,10-фенантролином. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/407562861/daf75cc17d0d1b8b796480bc59f740b8> (дата обращения: 23.10.2023).
7. Мордовин А.М., Шестеркин В.П., Антонов А.Л. Река Бурей: гидрология, гидрохимия и ихтиофауна. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2006. 149 с.

8. Шестеркин В.П., Сиротский С.Е., Шестеркина Н.М. Воздействие гидроэнергетического строительства на содержание и сток растворенных веществ в воде реки Бурея // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 4. С. 72–83.

9. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Гидрохимия Бурейского водохранилища в период заполнения (2005–2006 гг.) // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды Междунар. науч.-практ. конф. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2007. С. 100–104.

10. Chudaeva V.A., Shesterkin V.P., Chudaev O.V. Trace elements in surface water of the Amur River basin // *Water Resources*. 2011. Vol. 38, N 5. pp. 650–661.

11. Мордовин А.М., Петров Ю.С., Шестеркин В.П. Гидроклиматология и гидрохимия Зейского водохранилища. Владивосток; Хабаровск: Дальнаука, 1997. 138 с.

12. Шестеркин В.П. Многолетняя динамика содержания железа в воде Бурейского водохранилища // Водохранилища Российской Федерации: современные экологические проблемы, состояние, управление: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Новочеркасск: Лик, 2019. С. 403–409.

References

1. Edelstein, K.K.; Belova, S.L.; Zaslavskaya, M.B.; Novikova, E.V. Hydrological and hydrochemical aspects of water quality formation in drinking and recreational reservoirs. *Water Resources*. 1993, 20(5), 565–574. (In Russian).

2. Narita, H.; Shiraiwa, T.; Nakatsuka, T. Human activities in northeastern Asia and their impact on the biological productivity in north Pacific Ocean. In *Report on Amur-Okhotsk project*. RIHN: Kyoto. 2004, 2, 1–24.

3. Shamov, V.V.; Kulakov, V.V.; Onishi, T. Anomalous dynamics of iron in the rivers of the Amur system at the end of the twentieth century: probable causes. *Water purification, water treatment, water supply*. 2008, 10, 72–78. (In Russian)

4. Tashiro, Y.; Yoh, M.; Shiraiwa, T.; Onishi, T.; Shesterkin, V.; Kim, V. Seasonal variations of dissolved iron concentration in active layer and permafrost areas, Russian Far East. *Water*. 2020, 12(9), 2500. DOI: 10.3390/w12092579

5. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated 13.12.2016 N 552 (ed. dated 10.03.2020) “On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance”. Moscow: Ministry of Justice of Russia, 2017. No. 45203. (In Russian). Available online: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006> (accessed on 23 October 2023). (In Russian).

6. RD 52.24.358-2019. The mass concentration of total iron and gross iron in the waters. Measurement method by photometric method with 1,1-phenanthroline. (In Russian). Available online: <https://base.garant.ru/407562861/daf-75cc17d0d1b8b796480bc59f740b8> (accessed on 23 October 2023). (In Russian).

7. Mordovin, A.M.; Shesterkin, V.P.; Antonov, A.L. The Bureya River: hydrology, hydrochemistry, fish fauna. Institute of Water Ecological Problems, FEB RAS: Khabarovsk, Russia, 2006; 149 p. (In Russian).

8. Shesterkin, V.P.; Sirotsky, S.E.; Shesterkina, N.M. The impact of hydropower construction on the content and flow of dissolved substances in the water of the Bureya River. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2014, 4, 72–83. (In Russian).

9. Mordovin, A.M.; Petrov, E.S.; Shesterkin, V.P. Hydroclimatology and hydrochemistry of the Zeya Reservoir. Dal'nauka: Vladivostok-Khabarovsk, Russia, 1997; 138 p. (In Russian)

10. Shesterkin, V.P.; Shesterkina, N.M. Hydrochemistry of the Bureysky Reservoir during the filling period (2005–2006). In *Modern problems of reservoirs and their catchments*. Proceedings of the international scientific and practical conference. Publishing House of Perm University: Perm, Russia, 2007, 100–104. (In Russian)

11. Chudaeva, V.A.; Shesterkin, V.P.; Chudaev, O.V. Trace elements in surface water of the Amur River basin. *Water Resources*, 2011, 38(5), 650–661.

12. Shesterkin, V.P. Long-term dynamics of iron content in the water of the Bureysky Reservoir. In *Reservoirs of the Russian Federation: modern environmental problems, condition, management*. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Liki: Novocherkassk, Russia, 2019, 403–409. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 02.02.2023; одобрена после рецензирования 21.09.2023; принята к публикации 29.07.2023.

The article was submitted 02.02.2023; approved after reviewing 21.09.2023; accepted for publication 29.09.2023.

