

УДК 504.455(504.4.062.2)

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РЕКИ АНГАРЫ ПРИ СОЗДАНИИ БОГУЧАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (РОССИЯ)

Полетаева Вера Игоревна^{1,2},
alieva@igc.irk.ru

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью контроля за гидрохимическими параметрами крупной пресной водной экосистемы для объективной оценки трансформации водоема, находящегося под антропогенным воздействием.

Цель: изучить пространственно-временную динамику концентраций основных ионов в водах р. Ангары и Богучанском водохранилище.

Объекты: р. Ангара до ее зарегулирования плотиной Богучанской ГЭС (2007 г.) и Богучанское водохранилище в период его заполнения (2013, 2014 гг.) и стабилизации уровня (2015, 2017 гг.).

Методы. Химический анализ образцов воды проведен в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск, Россия). Измерение концентрации Na^+ и K^+ в воде выполнено эмиссионным пламенно-фотометрическим методом, Ca^{2+} и Mg^{2+} – методом атомно-абсорбционной спектроскопии, SO_4^{2-} – турбидиметрическим методом, Cl^- – меркуриметрическим методом, HCO_3^- – титриметрическим методом.

Результаты. В пространственно-временном аспекте изучены концентрации катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) и анионов (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-). Результаты исследования показали близкие значения TDS в воде мониторинговых станций р. Ангары (140,7–154,6 мг/л) и Богучанского водохранилища (139,1–172,3 мг/л). Однако увеличение уровня водоема приводит к изменению в соотношении концентраций главных ионов. По сравнению с р. Ангарой, в начальный период функционирования Богучанского водохранилища в воде увеличиваются концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , уменьшаются концентрации HCO_3^- и Ca^{2+} . Ионный состав вод Богучанского водохранилища определяется прежде всего вкладом из области, расположенной выше по потоку (сток из Усть-Илимского водохранилища). К антропогенным факторам относятся сточные воды и само создание водохранилища, оказывающие влияние на гидрохимию главных ионов.

Ключевые слова:

мониторинг, антропогенные эффекты, заполнение водохранилища, гидрохимия, главные ионы.

Введение

Ярким примером воздействия человеческой деятельности на поверхностные водные ресурсы является создание водохранилищ, которые используются в основном для снабжения человека питьевой и оросительной водой, а также производства электроэнергии. Создание водохранилищ нарушает естественные характеристики реки и создает ряд экологических проблем (изменение климата, загрязнение воды, разрушение водных и прилегающих наземных экосистем и т. д.) как во время их строительства, так и во время функционирования [1, 2].

В XX в. создание водохранилищ приобрело планетарный характер. По данным [3] в мире насчитывается более 45000 больших плотин с водохранилищами. В России гидротехническое строительство стало активно развиваться с середины XX в., а в настоящее время насчитывается 102 крупных ГЭС и большое количество мелких ГЭС [4]. К крупным рекам России, ландшафт речных бассейнов которых преобразован за счет их зарегулирования, относится р. Ангара (длина 1779 км) – единственный сток чистейшего пресного озера Байкал (рис. 1). В 50–70-е гг. XX в. на р. Ангаре создано Иркутское, Братское и Усть-Илимское водохранилища, которые изменили ее гидрологические характеристики на протяжении более 1000 км. В начале XXI в. при созда-

нии четвертого в каскаде Ангарских ГЭС Богучанского водохранилища трансформации подвергся еще один участок р. Ангары протяженностью 375 км. В результате строительства четырех плотин на р. Ангаре образовалась крупнейшая система хранения воды в мире [5]. Систематические гидрохимические данные по Иркутскому, Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам получены в разные периоды их функционирования [6–8]. Результаты исследования состава вод р. Ангары в зоне создания Богучанского водохранилища относятся к 70–80-м гг. XX в. [9]. Позднее разработана прогнозная математическая модель для учета возможных изменений общего содержания растворенных солей (total dissolved solids (TDS)) и концентрации органических веществ в воде р. Ангара после ее зарегулирования плотиной Богучанской ГЭС [10]. Показано, что при заполнении Богучанского водохранилища в среднем ожидается повышение TDS вод до 20–40 мг/л. Вместе с этим чтобы объективно ответить на вопрос, справится ли р. Ангара с антропогенной нагрузкой при создании четвертого водохранилища, необходимо проведение мониторинговых исследований всех компонентов экосистемы водоема. В первую очередь, должно быть проведено изучение гидрохимических характеристик созданного природно-техногенного водоема, которые являются надежными показателями при оценке эволюции водных объектов. В связи с этим целью работы является изучение пространственно-

временной динамики основных ионов в водах р. Ангара до ее зарегулирования плотиной Богучанской ГЭС и Богучанского водохранилища в период его наполнения и стабилизации уровня (режим эксплуатации).

Объект исследования

Река Ангара входит в состав крупнейшего в России бассейна р. Енисей, впадающего в Карское море Северного Ледовитого океана. Положение р. Ангара в центре материка определяет резко континентальный климат с большими колебаниями температур на территории ее бассейна. В бассейне Богучанского водохранилища среднегодовая температура воздуха колеблется в пределах от $-2,6$ до $-4,3$ °С, среднемесячная температура июля от $+18,1$ до $+18,8$ °С, января – от $-24,4$ до $-27,4$ °С [11]. Территория расположена в

юго-западной части Сибирской платформы и сложена терригенно-карбонатными породами кембрия и ордовика, терригенно-угленосными отложениями карбона, перми и юры, туфолововыми образованиями триаса и интрузиями траптов. Почти повсеместно развиты четвертичные отложения разного генезиса [12]. Особенностью подзолистых, дерново-подзолистых и торфяно-глеевых почв, преобладающих на территории, является обедненность гумусом и слабое развитие подзолообразовательного процесса, что связано с высокой степенью карбонатности многих почвообразующих пород и неблагоприятным гидротермическим режимом [12]. До создания Богучанского водохранилища русло р. Ангара из-за множества островов разделялось на два равнозначных рукава (рис. 1).

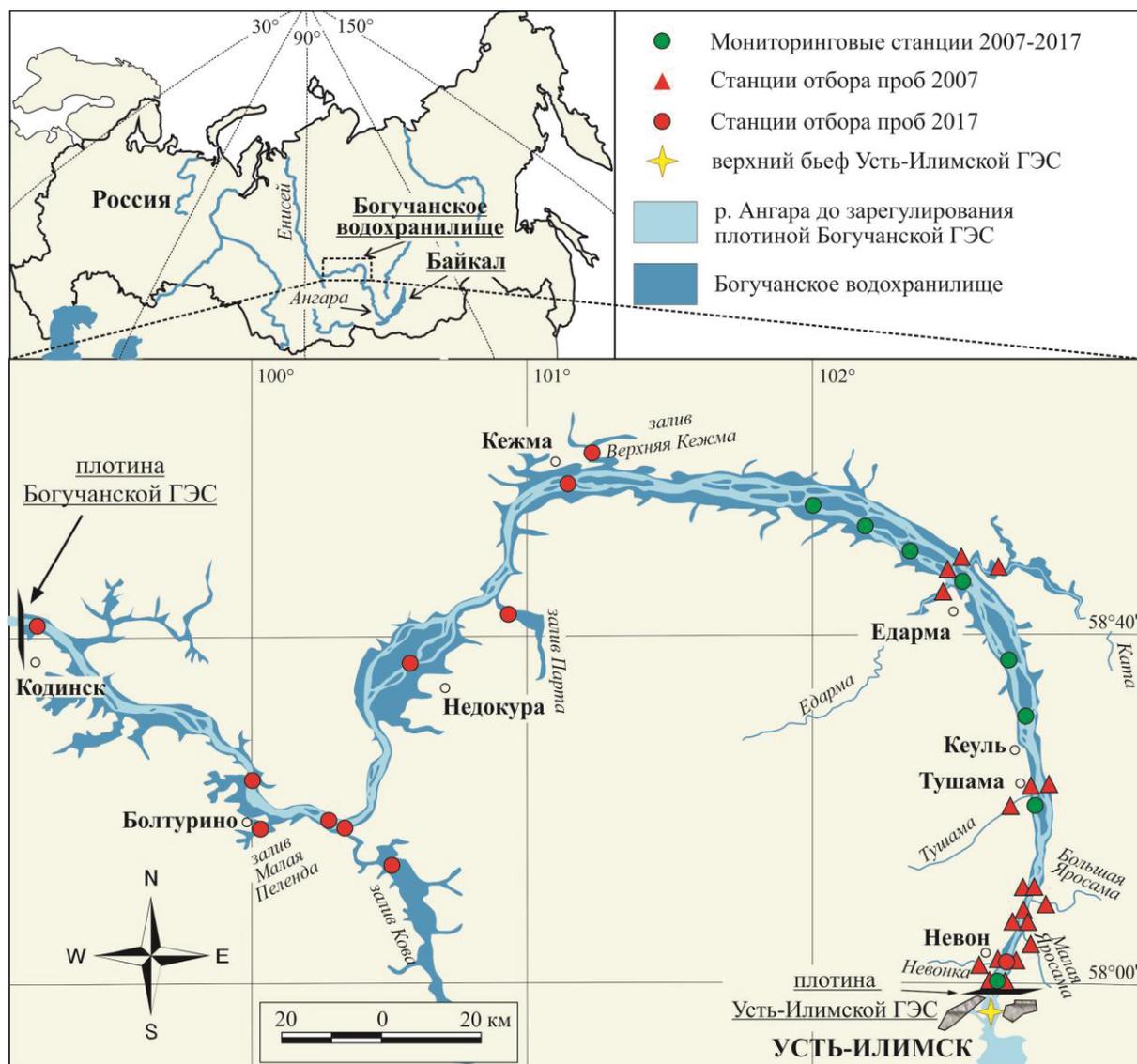


Рис. 1. Карта-схема района исследований

Fig. 1. Map of the study area

Строительство Богучанской ГЭС началось в 1980 г., а в 1987 г. было остановлено. Работы по строительству плотины Богучанской ГЭС продолжены в

2006 г. В 2012 г. началось заполнение водохранилища. В августе 2013 г. уровень воды в водохранилище составил 188 м БС, 2014 г. – 203 м БС. До проектной

отметки, соответствующей 208 м БС, Богучанское водохранилище заполнено в мае 2015 г. В августе 2015 г. уровень водохранилища составлял 207,6 м БС, 2017 г. – 207,0–207,5 м БС. На отметке 208 м над уровнем моря площадь водохранилища составляет 2326 км², длина – 375 км, максимальная глубина – 75 м, средняя глубина – 45 м. Приток воды в Богучанское водохранилище, определяется водами, поступающими из верхнего бьефа в нижний бьеф Усть-Илимской ГЭС и боковой приточностью.

Методы исследования

Изучение пространственно-временной динамики концентраций главных ионов в воде р. Ангары и Богучанского водохранилища выполнено в разные стадии функционирования водоемов:

- 2007 г. – р. Ангара до зарегулирования плотиной Богучанской ГЭС;
- 2013, 2014 гг. – Богучанское водохранилище в стадии подъема уровня при заполнении;
- 2015, 2017 гг. – Богучанское водохранилище в стадии стабилизации уровня и становления водоема.

В 2007, 2013, 2014 и 2015 гг. работы проводились на мониторинговых точках, приуроченных к верхней части Богучанского водохранилища (1–120 км ниже плотины Усть-Илимской ГЭС). В 2017 г. – по всей акватории Богучанского водохранилища (от Усть-Илимской ГЭС до Богучанской ГЭС), включая основные заливы водоема (рис. 1). Для изучения факторов формирования гидрохимического состава отобранные пробы воды на станции, расположенной в верхнем бьефе Усть-Илимской ГЭС, пробы вод основных притоков и вод р. Ангары выше и ниже впадения. Станции отбора проб нижнего бьефа Усть-Илимской ГЭС расположены в середине, а также по левому и правому берегам водоема.

В р. Ангаре и ее притоках (глубина не более 4 м) отбор проб воды осуществлен с поверхностного слоя воды (глубина 0,6 м). В Богучанском водохранилище по мере увеличения глубин (5 и более м) с двух горизонтов: поверхностного – с глубины 0,6 м и придонного – в метровом слое от дна. Пробы воды верхнего бьефа Усть-Илимской ГЭС отобраны с поверхностного (0,6 м) и придонного (100 м) слоя, а также с глубины 5, 10, 15, 25, 40, 50, 60 и 75 м. Отбор образцов воды осуществлен батометром Ocean Test 110А. Образцы собраны в предварительно очищенные емкости, которые перед отбором трижды ополаскивались отбираемой водой.

Основные ионы в образцах вод определены в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск, Россия). Измерение концентрации Na^+ и K^+ в воде выполнено эмиссионным пламенно-фотометрическим методом, Ca^{2+} и Mg^{2+} – методом атомно-абсорбционной спектрометрии, SO_4^{2-} – турбидиметрическим методом, Cl^- – меркуриметрическим методом, HCO_3^- – титриметрическим методом. Предел обнаружения (ПО) для Ca^{2+} составляет 0,2 мг/л, Mg^{2+} – 0,04 мг/л, Na^+ – 1 мг/л, K^+ – 1 мг/л, Cl^- – 1 мг/л, SO_4^{2-} – 10 мг/л, HCO_3^- – 6 мг/л. Для всех

анализов использовались реагенты высокой чистоты и вода milli-Q. Возможное загрязнение во время отбора проб проверялось по холостым образцам, предварительно подготовленным с использованием стандартной процедуры. Для проверки точности химического анализа каждой пробы между катионами и анионами была рассчитана процентная ошибка баланса ионов (ОБИ). ОБИ находилась в пределах $\pm 5\%$.

Результаты

Концентрация основных ионов в воде р. Ангары и Богучанского водохранилища

Значение минерализации в воде Богучанского водохранилища в 2017 г. изменяется в пределах от 139,1 до 172,3 мг/л. Концентрации основных ионов в его русловой части представлены на рис. 2 и в табл. 1. Результаты исследований показывают, что вариации в концентрации главных ионов наблюдаются как по глубине, так и по длине водохранилища. В воде верхней части водохранилища более высокие концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} (рис. 2). Концентрации Ca^{2+} , напротив, возрастают в нижней части водоема. В поверхностной и придонной воде большинства станций наблюдений концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- и Cl^- близки между собой. По сравнению с поверхностной, в придонной воде повышены концентрации SO_4^{2-} .

Концентрации главных ионов в основных заливах и русловой части водохранилища близки между собой (табл. 1, 2). Исключением является придонная вода зал. Кова, в которой более чем в 2 раза, по сравнению с поверхностной, повышены концентрации HCO_3^- , Ca^{2+} .

На мониторинговых станциях в воде р. Ангары до зарегулирования (2007 г.) концентрации HCO_3^- изменяются от 87,1 до 96,5 мг/л, SO_4^{2-} – от 9,9 до 18,9 мг/л, Cl^- – от 5,0 до 7,5 мг/л, Ca^{2+} – от 20,3 до 23,6 мг/л, Mg^{2+} – от 5,0 до 5,9 мг/л, Na^+ – от 6,6 до 7,3 мг/л, K^+ – от 1,02 до 1,13 мг/л. В воде Богучанского водохранилища (2013, 2014, 2015 и 2017 гг.) наблюдается межгодовая динамика концентраций главных ионов (рис. 3). Изменение речного режима водоема на режим водохранилища мало отразилось только на K^+ , концентрации которого весь период опробования изменялись от 1,02 до 1,30 мг/л. За весь период исследования наиболее близкими являются средние концентрации HCO_3^- , которые в 2007 г. составляют 93,0 мг/л, в 2013 г. – 85,8 мг/л, в 2014 г. – 85,3 мг/л, в 2015 г. – 87,0 мг/л и в 2017 г. – 90,3 мг/л. В 2007 и 2013 гг. близки между собой концентрации Ca^{2+} (от 20,3 до 23,6 мг/л) и Mg^{2+} (от 4,9 до 6,3 мг/л). По сравнению с водой р. Ангары, в воде Богучанского водохранилища в 2013 г. возрастают средние концентрации Cl^- (7,6 мг/л), SO_4^{2-} (20,2 мг/л), в меньшей степени Na^+ (7,3 мг/л). По сравнению с 2013 г., в 2014 и 2015 гг. средние концентрации SO_4^{2-} (15,7 и 13,3 мг/л, соответственно) уменьшаются, а Cl^- (8,6 и 8,6 мг/л, соответственно) и Na^+ (8,6 и 8,9 мг/л, соответственно) увеличиваются. На мониторинговых точках в 2017 г., по сравнению с 2007 г., средние концентрации SO_4^{2-} (14,0 мг/л), Cl^- (7,5 мг/л), Na^+ (8,9 мг/л), Mg^{2+} (7,9 мг/л) выше, а Ca^{2+} (18,6 мг/л) – ниже.

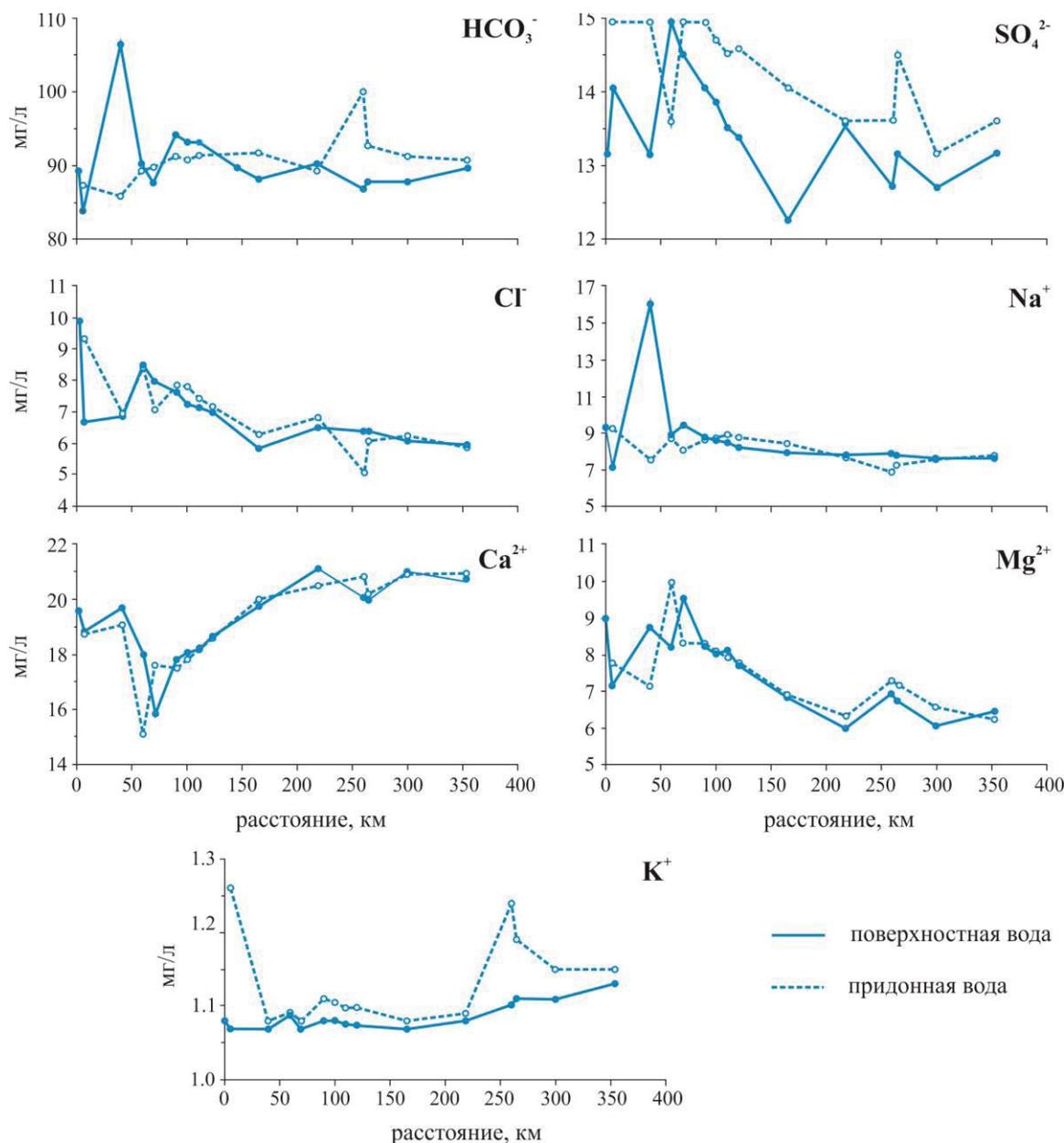


Рис. 2. Распределение главных ионов в воде Богучанского водохранилища в 2017 г.
 Fig. 2. Distribution of major ions in Boguchany reservoir water samples measured in 2017

Боковой приток

Левобережные притоки (р.р. Невонка, Тушамы, Едарма) и р. Малая Ярославка имеют более высокую TDS (263-373 мг/л), чем р. Ангара (табл. 1, 3). Правобережные притоки (р.р. Большая Ярославка, Ката) содержат меньшее количество растворенных веществ. По сравнению с правобережными, левобережные притоки содержат более высокие концентрации HCO₃⁻ (от 232 до 265 мг/л) и Na⁺ (от 36,5 до 49,1 мг/л). В концентрации других главных ионов не прослеживаются каких-либо значимых отличий у правобережных и левобережных притоков р. Ангары.

Концентрация главных ионов в верхнем бьефе УИ ГЭС

В верхнем бьефе УИ ГЭС в 2014 и 2017 гг. только концентрации K⁺ находятся в близком интервале (от 1,0 до 1,5 г/л). Распределение других ионов неодно-

родно по глубине (рис. 4). В 2014 и 2017 гг. на глубинах от 0 до 40 м концентрация HCO₃⁻ в воде составляет 74,7–81,0 мг/л, SO₄²⁻ – 11,6–16,0 мг/л, Cl⁻ – 3,1–4,1 мг/л, Ca²⁺ – 17,6–21,9 мг/л, Mg²⁺ – 4,5–6,6 мг/л, Na⁺ – 4,7–5,4 мг/л. TDS изменяется от 123,9 до 135,3 мг/л при среднем значении 127,8 мг/л. На глубинах от 40 до 100 м в воде верхнего бьефа УИВ TDS повышается от 135,3 до 359,3 мг/л. В 2014 г. в большей степени изменяются концентрации Cl⁻ (до 35,19 мг/л), Na⁺ (до 14,9 мг/л) и Mg²⁺ (до 11,2 мг/л), в меньшей степени – концентрации HCO₃⁻ (до 87,8 мг/л), SO₄²⁻ (до 19,0 мг/л), Ca²⁺ (до 24,0 мг/л). В 2017 г. большая вариабельность отмечена для всех главных ионов: HCO₃⁻ (от 82,0 до 139,1 мг/л), SO₄²⁻ (от 13,5 до 24,1 мг/л), Cl⁻ (от 4,9 до 87,5 мг/л), Ca²⁺ (от 22,0 до 34,2 мг/л), Mg²⁺ (от 5,2 до 12,3 мг/л), Na⁺ (от 6,4 до 59,0 мг/л).

Таблица 1. *Гидрохимический состав оз. Байкал, р. Ангары и водохранилищ Ангарского каскада ГЭС, мг/л*
Table 1. *Hydrochemical composition of Lake Baikal, Angara River and its reservoirs. The values are in mg L⁻¹*

Водоем/Pond	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	TDS	Источник References
Озеро Байкал /Lake Baikal	66,3	5,5	0,44	16,4	3,0	3,3	1,0	~96	[13]
Исток р. Ангары Angara River source	66,2	5,70	0,60	15,4	3,3	4,2		95,6	[14]
Иркутское водохранилище Irkutsk reservoir	66,5	5,6	0,9	16,1	3,6	3,8		96,5	[7]
Братское водохранилище Bratsk reservoir	71,9	11,3	3,0	19,8	3,9	4,0	1,0	101,2–127,7	[15]
Усть-Илимское водохранилище Ust-Ilimsk reservoir	79,6	16,2	5,5	19,1	6,5	6,3	1,1	134,7	[16]
Верхний бьеф Усть-Илимской ГЭС UST-Ilimsk HPP headwater	77,8(100,0)*	13,9(18,7)	3,6(34,3)	20,3(25,7)	5,1(8,7)	5,0(22,8)	1,0(1,3)	127,1(212,0)	настоящее исследование this study
р. Ангара в районе Богучанского водохранилища (мониторинговые станции, 2007 г.) Angara River close to Boguchany reservoir (monitoring stations, 2007)	<u>87,1–96,5</u> ** 93,0	<u>9,9–18,9</u> 11,9	<u>5,0–7,5</u> 6,5	<u>20,3–23,6</u> 22,1	<u>5,0–5,9</u> 5,6	<u>6,6–7,3</u> 7,0	<u>1,0–1,1</u> 1,1	<u>140,7–154,6</u> 147,8	
Богучанское водохранилище (мониторинговые станции, 2017 г.) Boguchany reservoir (monitoring stations, 2017)	<u>83,9–106,4</u> 90,3	<u>12,2–14,9</u> 14,0	<u>5,8–9,9</u> 7,5	<u>15,1–21,1</u> 18,6	<u>6,0–10,0</u> 7,9	<u>7,1–16,0</u> 8,9	<u>1,1–1,3</u> 1,1	<u>139,1–172,3</u> 150,1	

Примечание: * – средняя концентрация в слое воды от 0 до 40 м (средняя концентрация в слое воды от 40 до 100 м); ** – в числителе – минимальное-максимальное значения, в знаменателе – среднее значение.

Note: * – mean concentration in 0–40 m water layer (mean concentration in the 40–100 m water layer); ** – numerator – the minimum and maximum values, denominator – mean value

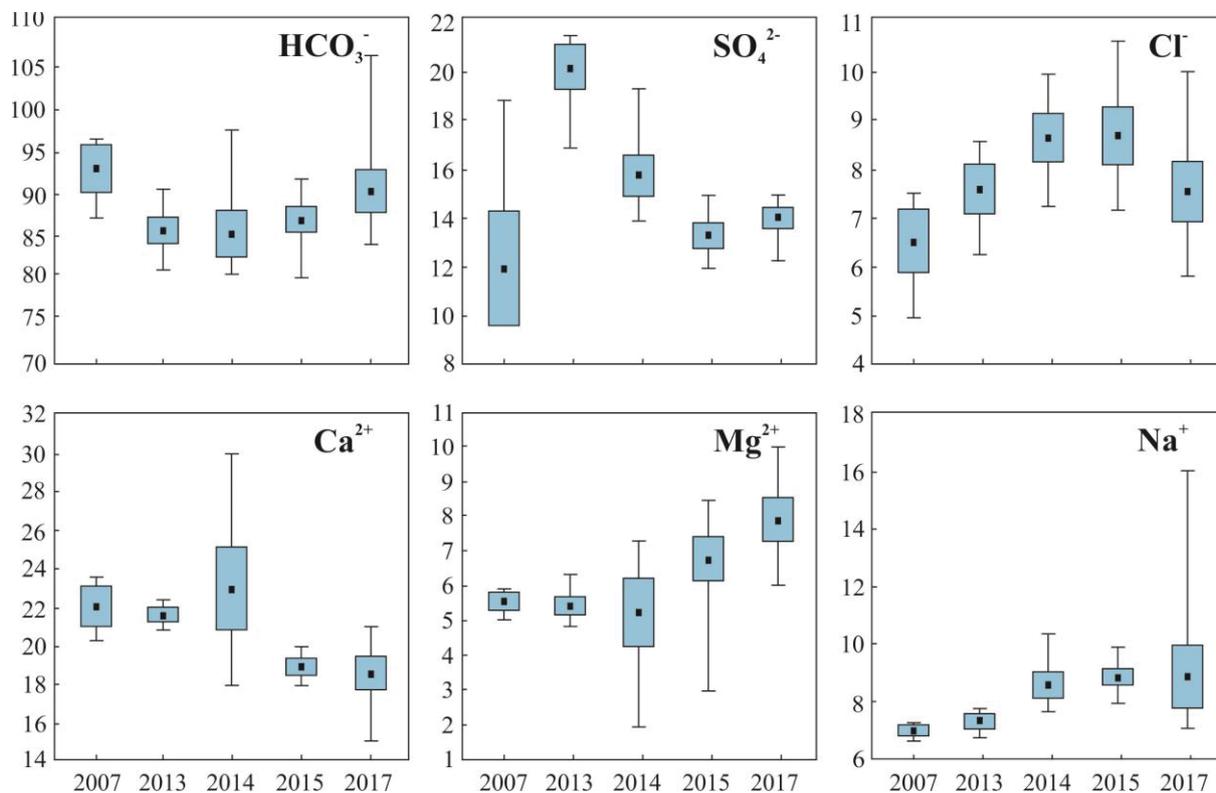


Рис. 3. Концентрация основных ионов (мг/л) в воде мониторинговых станций р. Ангары (2007 г.) и Богучанского водохранилища (2013–2017 гг.). Прямоугольник – стандартная ошибка, точка в прямоугольнике – среднее значение, усы – максимальное и минимальное значение.

Fig. 3. Concentrations of major ions at monitoring stations on the Angara River (2007) and Boguchany reservoir (2013–2017). Concentrations are given in mg L⁻¹. The boxes represent standard deviations, the points in the boxes represent mean values, and the whiskers indicate maximum and minimum values

Таблица 2. Концентрации главных ионов и величина минерализации в заливах Богучанского водохранилища, мг/л
Table 2. Major ion concentrations and mineralization in bays of the Boguchany reservoir. The values are in mg L^{-1}

Станция/Stations	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	TDS
зал. Кежма/Kezhma Bay (1)	90,3	6,3	13,1	17,6	8,1	8,1	1,08	144,8
зал. Кежма/Kezhma Bay (2)	92,2	6,7	13,6	16,7	8,9	8,6	1,11	148,1
зал. Парга/Parta Bay (1)	92,5	5,9	13,1	20,8	6,1	8,2	1,12	148,0
зал. Парга/Parta Bay (2)	107,8	4,6	12,1	21,8	6,3	9,7	1,38	164,6
зал. Кова/Kova Bay (1)	88,8	4,8	13,5	20	6,6	6,4	1,27	141,8
зал. Кова/Kova Bay (2)	194,7	2,7	13,7	49,7	5,2	9,1	2,07	278,9
Зал. Малая Пеленда/Malaya Pelenda Bay (1)	92,7	6,3	13,1	20,9	6,0	7,6	1,12	148,1
зал. Малая Пеленда/Malaya Pelenda Bay (2)	87,8	6,7	12,7	21,2	6,2	7,8	1,55	144,3

Примечание: * – 1 – поверхностная вода, 2 – придонная вода.
 Note: * – 1 – surface water, 2 – bottom water.

Таблица 3. Гидрохимический состав притоков р. Ангары, мг/л

Table 3. Water geochemistry of the Angara River tributaries. The values are in mg L^{-1}

Станция/Stations	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	TDS
р. Малая Ярослав/ Malaya Yarosama River	175	7,8	15,8	38,2	10,8	13,9	<1	263
р. Большая Ярослав/Bolshaya Yarosama River	126	<1	4,3	19,6	7,1	11,9	<1	170
р. Ката/Kata River	99	6,0	13,3	22,7	4,7	11,7	1,0	159
р. Невонка/Nevonka River	232	2,4	6,2	31,6	9,9	36,5	<1	320
р. Тушам/ Tushama River	262	8,6	9,6	42,8	11,1	37,0	1,2	373
р. Едарма/Edarma River	265	5,4	8,3	33,5	9,4	49,1	1,2	372

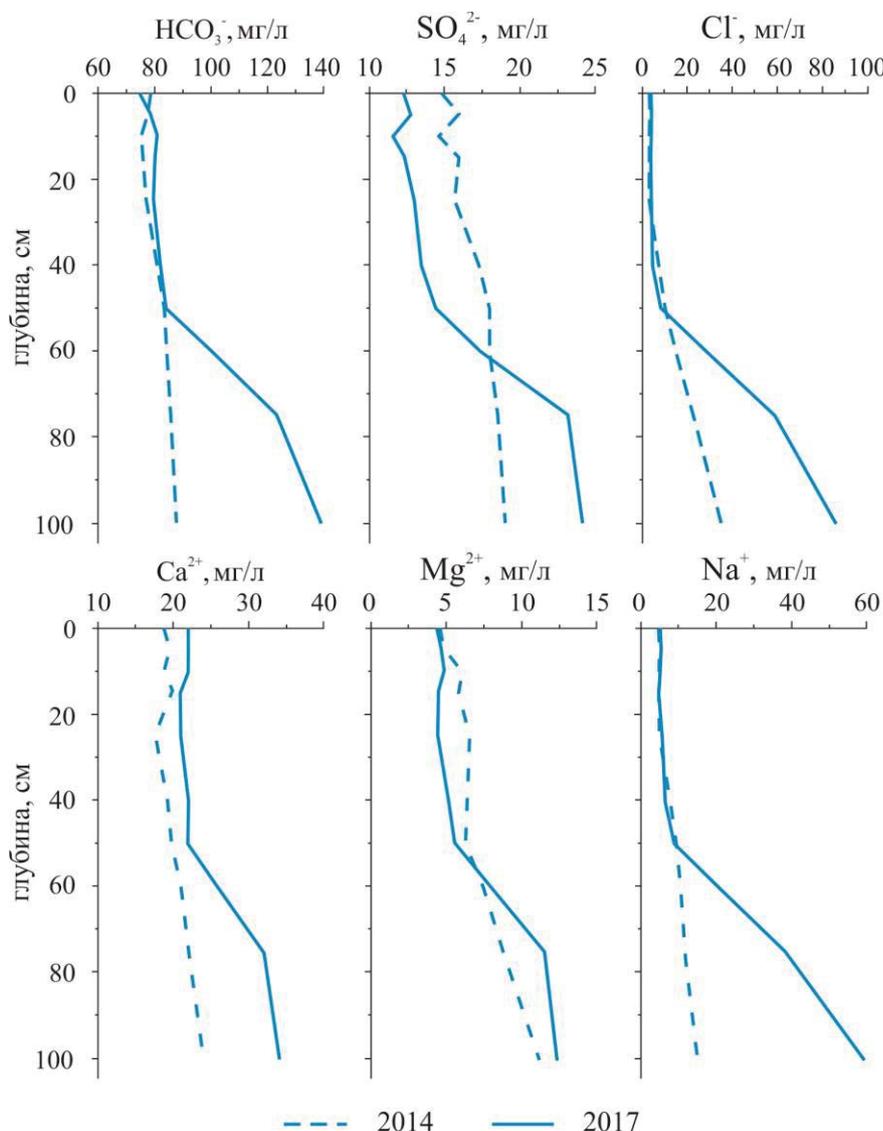


Рис. 4. Распределение главных ионов в воде верхнего бьефа УИ ГЭС

Fig. 4. Distribution of the major ions in water samples from the Ust-Ilimsk HPP headwater

Обсуждение

При изучении химического состава вод к основным источникам растворенных солей относят морские соли, выветривание минералов, а также антропогенное воздействие [17, 18]. Внутриконтинентальное расположение Богучанского водохранилища (рис. 1) позволяет пренебречь вкладом морских солей. Большое влияние на формирование гидрохимического состава оказывает водный режим водоема. И. Бочкаревым (1959) определено, что отличительной особенностью р. Ангары до зарегулирования, определяющей гидрохимический состав реки на всем протяжении, является ее питание из оз. Байкал. Доля байкальского стока в устье реки составляет 45 %. В связи с этим на формирование гидрохимического состава Богучанского водохранилища и р. Ангары влияют байкальские воды, поступающие на входной створ водохранилища через плотину УИ ГЭС. Еще одной составляющей приходной части водного баланса водохранилища является боковой приток. Относительная важность источников растворенных солей для Богучанского водохранилища обсуждается ниже.

Сток оз. Байкал, трансформированный
в вышерасположенных водохранилищах

Гидрохимический состав оз. Байкал характеризуется постоянством концентраций основных ионов и низкой минерализацией (около 96 мг/л) [13]. Вода р. Ангары и Богучанского водохранилища также имеет низкую минерализацию, несколько повышенную относительно воды озера (табл. 1). Тенденция доминирования анионов в воде оз. Байкал, истока р. Ангары, Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ сохраняется и в воде Богучанского водохранилища: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ (табл. 1). В распределении катионов в оз. Байкал и водохранилищах р. Ангары наблюдается общая закономерность: концентрации $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. Для Богучанского водохранилища ведущим катионом остается Ca^{2+} . Концентрации Na^+ увеличиваются и в большинстве образцов вод становятся больше концентраций Mg^{2+} . В воде водохранилища средние концентрации главных ионов выше, чем в оз. Байкал, истоке р. Ангары и водохранилищах Ангарского каскада (табл. 1). Исключением является SO_4^{2-} , средняя концентрация которого в Богучанском водохранилище выше, чем в воде оз. Байкал, истока р. Ангары, Иркутского и Братского водохранилищ, но ниже, чем в Усть-Илимском водохранилище. Изменение режима основных ионов по течению р. Ангары до ее зарегулирования происходило под влиянием горных пород, распространенных в пределах водосборного бассейна, и в меньшей степени с поступлением вод притоков различного генезиса [19].

Детальное исследование вод, поступающих в Богучанское водохранилище через плотину УИ ГЭС, показало, что концентрации главных ионов в слое от 0 до 40 м, сопоставимые между собой (рис. 4), отражают сток оз. Байкал, трансформированный в Иркутском, Братском и Усть-Илимском водохранилищах (табл. 1). На глубинах от 40 до 100 м концентрации главных ионов значительно повышаются. Химиче-

ский состав глубинных слоев воды верхнего бьефа УИ ГЭС претерпевает существенные преобразования за счет подтока высокоминерализованных подземных вод хлоридно-натриевого состава [16]. В связи с этим на входном створе Богучанского водохранилища концентрации главных ионов, особенно Cl^- и Na^+ (рис. 3), повышены относительно средних по Усть-Илимскому водохранилищу.

Выветривание

Для понимания доминирующих факторов, контролирующей химию природных вод, используется диаграмма Гиббса [20]. На диаграмме все образцы воды Богучанского водохранилища попадают в зону взаимодействия воды и породы, вклад испарения и атмосферных осадков минимален (рис. 5). Наиболее распространенными породами водосбора являются карбонаты (доломиты, известняки) и обогащенные карбонатами силикаты (песчаники, аргиллиты, алевролиты, мергели и др.) [12]. Эти породы обогащают воду Mg^{2+} , Ca^{2+} и HCO_3^- .

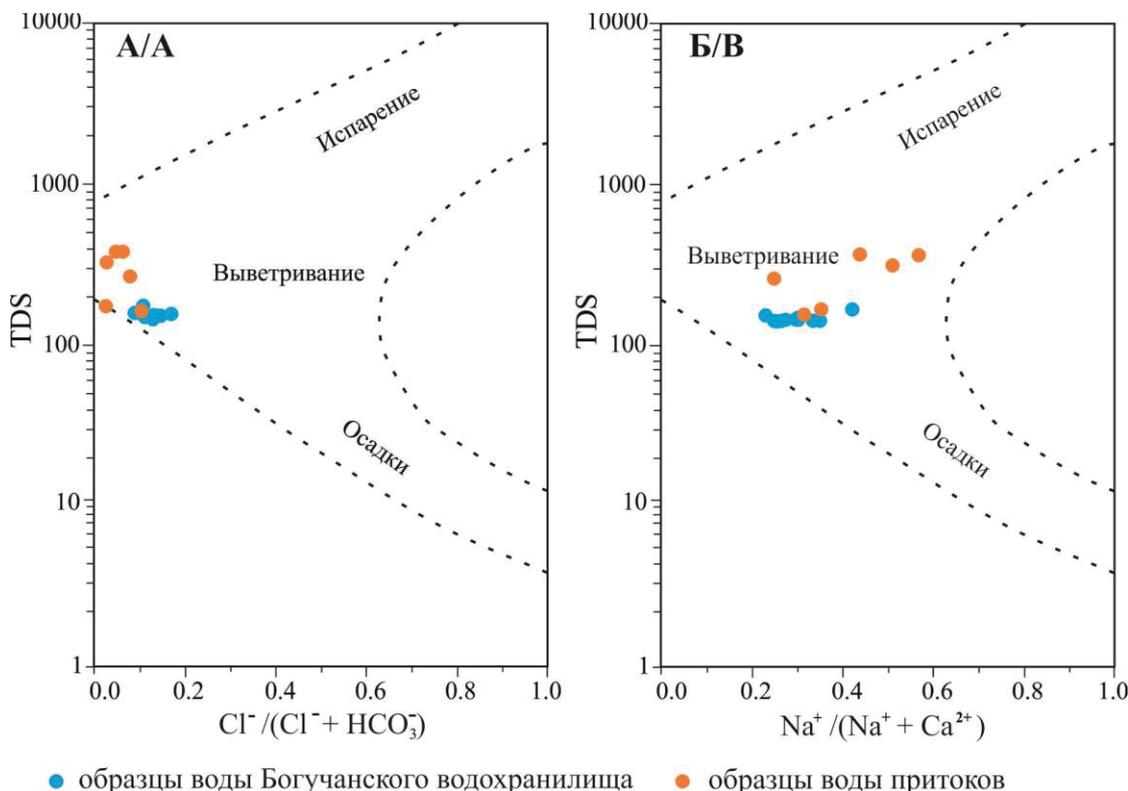
Боковой приток

В анионном составе всех притоков доминирующим является HCO_3^- , далее SO_4^{2-} и Cl^- (табл. 4). В катионном составе рек Невонка и Едарма концентрации $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, рек Малая Яросама, Большая Яросама, Ката, Тушама – $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. В соответствии с диаграммой Гиббса, к основным факторам их формирования также относится влияние горных пород (рис. 5). Для всех рек наблюдается положительная зависимость между концентрациями HCO_3^- и Na^+ ($r=0,93$, $p<0,01$), Ca^{2+} ($r=0,77$, $p<0,05$) и Mg^{2+} ($r=0,81$, $p<0,05$), а также Cl^- и SO_4^{2-} ($r=0,79$, $p<0,05$). Формирование гидрохимического состава притоков р. Ангары, впадающих ниже Усть-Илимской ГЭС, определяет снеговое (62–72 %) и грунтовое (25–28 %) питание. В связи с этим вариации в воде притоков концентраций HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} отражают субаквальную разгрузку гидрокарбонатных щелочноземельных, щелочноземельно-натриевых и натриево-щелочноземельных грунтовых вод, формирующихся в бассейнах рек [12].

До зарегулирования р. Ангары воды притоков влияли на концентрацию основных ионов в воде реки вдоль берега их впадения, влияние боковой приточности в центральной части и у противоположного берега не определено. Концентрации основных ионов в наиболее близких от притоков русловых точках верхней части Богучанского водохранилища показывают, что при увеличении уровня воды влияние боковой приточности также не прослеживается в центральной части водоема. В нижней части отмечено увеличение концентраций HCO_3^- , SO_4^{2-} в придонном слое воды в районе устья зал. Кова (260 км, рис. 2) и ниже от него (265 км, рис. 2). В самом заливе также обнаружены повышенные концентрации HCO_3^- и Ca^{2+} (табл. 2). Гидрокарбонатно-кальциевые воды р. Кова в период межени могут изменять тип воды за счет фильтрации в русло реки подземных вод с содержанием сульфатного иона до 300 мг/л и минерализацией до 2000 мг/л.

Помимо подземного питания повышение концентраций Ca^{2+} в придонных водах залива и прилегающей к нему русловой части водохранилища отражает влия-

ние попавших в зону затопления торфяных болот, которые характеризуются высоким содержанием обменного кальция (74,0–90,0 мг-экв/100 г почвы) [21].



● образцы воды Богучанского водохранилища ● образцы воды притоков
Рис. 5. Диаграмма Гиббса для вод Богучанского водохранилища и его притоков: (А) общее количество растворенных твердых веществ (TDS) в зависимости от соотношения эквивалентности $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$; (Б) отношение TDS к соотношению эквивалентности $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$.

Fig. 5. Gibbs diagram of water samples from the Boguchany reservoir and its tributaries: (A) total dissolved solids (TDS) vs. equivalence ratio of $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$; (B) TDS vs. equivalence ratio of $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$

Антропогенные факторы

На гидрохимический состав р. Ангары и ее водохранилищ выше Богучанского водохранилища влияют крупные промышленные комплексы гг. Иркутск, Ангарск, Усолье-Сибирское, Братск, Усть-Илимск [15, 22]. В Богучанское водохранилище по левому берегу (1 км ниже плотины УИ ГЭС) поступают сточные воды «Иркутскэнерго» и ливневых канализационных стоков г. Усть-Илимска, в составе которых из загрязняющих веществ выделены сульфаты и хлориды [23]. По правому берегу (12 км ниже плотины УИ ГЭС) – сточные воды Усть-Илимского лесопромышленного комплекса, поступающие через глубоководный выпуск и содержащие высокие концентрации Cl^- и SO_4^{2-} (463 и 65,4 мг/л, соответственно) [23]. Для Богучанского водохранилища показателем поступления сточных вод является увеличение концентраций Cl^- в поверхностных и придонных водах в 1 км ниже УИ ГЭС, а также SO_4^{2-} в придонных водах на участке 1–40 км ниже УИ ГЭС (рис. 2).

К антропогенному воздействию на водоем относятся и само образование водохранилища. Важными компонентами, контролирующими продуктивность водоема во время функционирования водохранилищ, являются растворенный кислород, соединения азота и

фосфора [24]. Происходит и изменение гидрохимии главных ионов. При этом наибольшие вариации в концентрации этих компонентов в воде наблюдаются на первых этапах эволюции новых природно-техногенных водоемов. Так, в водохранилище, созданном на реке Бигхорн (США), концентрации Mg^{2+} , Na^+ и SO_4^{2-} в первый год снижаются, а в последующий – увеличиваются [25]. Создание водохранилища на р. Тиста (Гималаи) вызвало снижение в воде концентраций Cl^- , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} и увеличение Ca^{2+} , SO_4^{2-} [26]. В водохранилище Даньцзянкоу (Китай) наблюдается ежегодное увеличение антропогенных маркеров – концентраций Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ и K^+ [27]. После зарегулирования р. Ангары концентрации главных ионов также подвержены вариациям (рис. 3). Повышение уровня воды в первый год заполнения водохранилища приводит к увеличению концентраций SO_4^{2-} , Cl^- и Na^+ и уменьшению концентраций HCO_3^- . В период дальнейшего подъема и стабилизации уровня водохранилища концентрации SO_4^{2-} уменьшаются, а концентрации Cl^- , Mg^{2+} и Na^+ еще более увеличиваются. В 2017 г. только средняя концентрация HCO_3^- приближается к таковой до зарегулирования реки. Средние концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} и Na^+ остаются повышенными относительно 2007 г. Рас-

считанные коэффициенты корреляции за весь период исследований указывают на взаимосвязь уровня водохранилища и концентраций Na^+ ($r=0,60$, $p<0,01$), Cl^- ($r=0,50$, $p<0,01$), Mg^{2+} ($r=0,47$, $p<0,01$), HCO_3^- ($r=-0,52$, $p<0,01$), Ca^{2+} ($r=-0,57$, $p<0,01$) в поверхностной воде, а также Na^+ ($r=0,63$, $p<0,01$) и SO_4^{2-} ($r=-0,94$, $p<0,01$) в придонной воде.

Определение взаимосвязей между главными ионами в водах мониторинговых станций р. Ангары и Богучанского водохранилища проведено на основе расчета коэффициентов парной корреляции (табл. 4). Определено, что до зарегулирования р. Ангары Ca^{2+} положительно коррелирует с HCO_3^- ($r=0,57$, $p<0,01$) и отрицательно с Mg^{2+} ($r=-0,71$, $p<0,01$). Выделенная зависимость между этими компонентами характерна для пресных гидрокарбонатных кальциевых вод [28]. Результаты корреляционного анализа в годы заполнения водохранилища выявили положительную корреляцию между HCO_3^- и Ca^{2+} в 2014 г. ($r=0,76$, $p<0,01$), HCO_3^- и Na^+ в 2014 г. ($r=0,88$, $p<0,01$), в 2015 г. ($r=0,65$, $p<0,01$), в 2017 г. ($r=0,89$, $p<0,01$), Ca^{2+} и Na^+ в 2014 г. ($r=0,79$, $p<0,01$), Cl^- и Na^+ в 2013 г. ($r=0,87$, $p<0,01$), 2014 г. ($r=0,63$, $p<0,05$), 2015 г. ($r=0,92$, $p<0,01$), которая демонстрирует их общие источники поступления. Как показано выше, из выделенных элементов, часть концентраций HCO_3^- и Ca^{2+} в воде Богучанского водохранилища связаны с водовмещающими карбонатными породами, на активизацию выветривания которых в приурезовой зоне влияет увеличение уровня воды. При отсутствии в бассейне водовмещающих пород, содержащих Cl^- и Na^+ (галиты, сильвиниты и т. д.), повышение концентраций этих элементов в водной среде связывают с влиянием деятельности человека [29]. Однако результаты исследования 2017 г. показывают, что поступление сточных вод повышает концентрацию Cl^- в воде водохранилища только в районе их впадения, а концентрация Na^+ вблизи выпуска сточных вод близка к средней по всему водоему (рис. 2).

Одним из последствий, связанных с повышением уровня воды, является изменение гидрогеологических условий в бассейне водоема [30, 31]. Масштаб и направленность таких изменений отражают величину подпора уровня, интенсивность вертикального водообмена в днище долины реки, а также особенности гидрогеологического режима. Так, до создания водо-

охранилища Силуоду (Китай) подземные воды пополняли речную воду, а после создания водохранилища эта связь изменилась на обратную [32]. Противоположная зависимость была обнаружена в зоне подпора Братского водохранилища, в процессе наполнения которого существенно изменились условия разгрузки артезианских вод [33]. Результатом увеличения уровня воды стало внедрение высокоминерализованных вод глубокой циркуляции по зонам повышенной трещиноватости, что привело к увеличению концентраций Cl^- и Na^+ в воде зоны подпора Братского водохранилища.

В верхней части бассейна Богучанского водохранилища формирование режима грунтовых вод тесно связано с наличием тектонических разломов и зон повышенной трещиноватости. На этом участке водохранилища водоносные комплексы приурочены к отложениям катской и тушамской свит карбона (правый берег) и отложениям мамырской свиты ордовика и бадарановской и ийской свит нижнего ордовика (левый берег). Гидрогеологическая съемка, проведенная до зарегулирования реки [12], показала, что существенное воздействие на разгрузку подземных вод на этой территории оказывают сильно трещиноватые пластовые интрузии траппов, к которым приурочены все крупнейшие водопоявления (родники до 150 л/с). Грунтовые воды гидрокарбонатные кальциевые или магниевые, напорные воды гидрокарбонатные натриевые, сменяющиеся вниз по разрезу на сульфатно-хлоридные или хлоридные натриевые. До зарегулирования р. Ангары соленые хлоридные воды выходили на ее побережье в виде источников. На данном этапе исследования можно предположить, что при увеличении уровня воды в водохранилище произошло изменение гидрогеохимической обстановки, определившее смену уровня грунтовых вод. Вследствие этого по зонам повышенной трещиноватости могли внедриться воды более глубоких слоев гидрохимического разреза. С этим явлением может быть связано увеличение концентраций сульфат-иона в 2013 г. и их последующее уменьшение в 2014 и 2015 гг., последовательное увеличение концентраций ионов хлора и натрия с 2013 г. (рис. 4), а также совместное поступление HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} и Cl^- (табл. 4), изменяющееся по мере увеличения и стабилизации уровня водохранилища.

Таблица 4. Статистические значимые коэффициенты корреляции между основными ионами в воде р. Ангары и верхней части Богучанского водохранилища

Table 4. Statistical significant correlations between concentrations of major ions in the Angara River and Boguchany reservoir water

Параметры Parameters	Коэффициент корреляции/Correlation coefficient				
	2007 (n=15)	2013 (n=11)	2014 (n=14)	2015 (n=16)	2017 (n=16)
HCO_3^-	(+)Ca ²⁺ **	–	(+)Ca ²⁺ **, (+)Na ⁺ **, (–)K ⁺ *	(+)Na ⁺ **, (+)Cl [–] *	(+)Na ⁺ **
Cl [–]	–	(+)Na ⁺ **, (+)K ⁺ *	(+)Na ⁺ *	(+)Na ⁺ **, (+)HCO ₃ [–] *	(+)Mg ²⁺ *
SO ₄ ^{2–}	–	–	–	–	–
Ca ²⁺	(+)HCO ₃ [–] **, (–)Mg ²⁺ **	(–)Mg ²⁺ *	(+)HCO ₃ [–] **, (+)Na ⁺ **, (–)Mg ²⁺ **	–	(–)Mg ²⁺ **
Mg ²⁺	(–)Ca ²⁺ **	(–)Ca ²⁺ *	(–)Ca ²⁺ **, (+)K ⁺ *, (–)Na ⁺ *	–	(–)Ca ²⁺ **, (+)Cl [–] *
Na ⁺	–	(+)Cl [–] **	(+)HCO ₃ [–] **, (+)Ca ²⁺ **, (+)Cl [–] *, (–)Mg ²⁺ *	(+)HCO ₃ [–] **, (+)Cl [–] **	(+)HCO ₃ [–] **
K ⁺	–	(+)Cl [–] *	(+)Mg ²⁺ *, (–)HCO ₃ [–] *	–	–

* – $p<0,05$; ** – $p<0,01$.

Заключение

Мониторинговые гидрохимические исследования позволили изучить пространственно-временное распределение главных ионов в воде р. Ангары до ее зарегулирования плотиной Богучанской ГЭС и Богучанского водохранилища в период его заполнения и стабилизации уровня. Результаты исследования показали низкое значение TDS в воде р. Ангары и Богучанского водохранилища на всех этапах его формирования. Основным анионом в воде является HCO_3^- , катионом – Ca^{2+} . С точки зрения природных факторов, на формирование режима главных ионов в воде Богучанского водохранилища большое влияние оказывает сток оз. Байкал, трансформированный в вышерасположенных водохранилищах р. Ангары, и выветривание пород, представленных в основном карбонатами или обогащенными карбонатами силикатами. Боковой приток не оказывает значительного влияния на концентрацию главных ионов в русловой части Богучанского водохранилища. С точки зрения антропогенных факторов, на гидрохимию Богучанского водохранилища влияют производственные сточные воды Усть-Илимской промышленной зоны, которые увеличивают концентрации главных ионов в воде водоема в районе их впадения. Ниже по течению концентрации элементов антропогенного происхождения уменьшаются до средних по водохранилищу значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ligon F.K., Dietrich W.E., Trush W.J. Downstream ecological effects of dams // *Bioscience*. – 1995. – V. 45. – № 3. – P. 183–192.
2. Ghosh S., Guchhait S.K. Hydrogeomorphic variability due to dam constructions and emerging problems: a case study of Damodar River, West Bengal, India // *Environment, Development and Sustainability*. – 2014. – V. 16. – № 3. – P. 769–796.
3. Dams and development. A new framework for decision-making. The report of World Commission on Dams. – London: Earthscan Publications Ltd, 2000. – 448 p.
4. Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России. Справочник / М.И. Дворецкая, А.П. Жданова, О.Г. Лушников, И.В. Слива. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 224 с.
5. Jaguś A., Rzętała M.A., Rzętała M. Water storage possibilities in Lake Baikal and in reservoirs impounded by the dams of the Angara River cascade // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – V. 73 – P. 621–628.
6. Верболова Н.В. Формирование гидрохимического режима Братского водохранилища // Формирование планктона и гидрохимия Братского водохранилища. – Новосибирск: Наука, 1973. – С. 78–119.
7. Карнаухова Г.А. Гидрохимия Ангары и водохранилищ Ангарского каскада // *Водные ресурсы*. – 2008. – Т. 35. – № 1. – С. 71–79.
8. Изменение гидрохимического состава заливов Братского водохранилища в результате лесозаготовительных работ / В.И. Полетаева, М.В. Пастухов, Н.А. Загорюлько, Г.А. Белоголова // *Водные ресурсы*. – 2018. – Т. 45. – № 3. – С. 278–288.
9. Стрижева Т.А. Условия и особенности формирования гидрохимического режима, состава и качества вод искусственных водоемов Восточной Сибири (на примере Усть-Илимского водохранилища): автореф. дис. ... канд. географ. наук. – Иркутск, 1985. – 19 с.
10. Savichev O.G., Matveenko I.A. Evaluation of chemical composition changes of surface water in Boguchan Reservoir (Siberia, Russia) // *Hydrological Sciences Journal*. – 2013. – V. 58. – № 3. – P. 706–715.
11. Вольничков А.Н. Богучанская ГЭС – пусковой объект российской гидроэнергетики // *Гидротехническое строительство*. – 2010. – № 10. – С. 30–37.
12. Богучанское водохранилище. Подземные воды и инженерная геология территории / под ред. М.М. Одинцова. – Новосибирск: Наука, 1979. – 157 с.
13. Current chemical composition of Lake Baikal water / T.V. Khodzher, V.M. Domyshveva, L.M. Sorokovikova, M.V. Sakirko, I.V. Tomberg // *Inland Waters*. – 2017. – V. 7. – № 3. – P. 250–258.
14. The cyclicity in the changes in the chemical composition of the water source of the Angara River (Baikal Stock) in 2017–2018 in comparison with the last 20 years of data / V.I. Grebenshchikova, M.I. Kuzmin, A.A. Doroshkov, O.A. Proydakova, S.B. Tsydyypova // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2019. – V. 191. – 728.
15. Poletaeva V.I., Tirsikh E.N., Pastukhov M.V. Hydrochemistry of sediment pore water in the Bratsk reservoir (Baikal region, Russia) // *Scientific Reports*. – 2021. – V. 11. – 11124.
16. Полетаева В.И., Долгих П.Г., Пастухов М.В. Особенности формирования гидрохимического режима Усть-Илимского водохранилища // *Вода: химия и экология*. – 2017. – № 10. – С. 11–17.
17. Berner E.K., Berner R.A. *Global environmental: water, air and geochemical cycles*. – New York: Prentice-Hall, 1996. – 376 p.
18. Hydrochemical characteristics and irrigation suitability of surface water in the Syr Darya River, Kazakhstan / W. Zhang, L. Ma, J. Abuduwaili, Y. Ge, G. Issanova, G. Saparov // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2019. – V. 191. – 572.
19. Бочкарев П.Ф. Гидрохимия рек восточной Сибири. – Иркутск: Вост. Сиб. изд-во, 1959. – 156 с.
20. Gibbs R.J. *Mechanisms controlling world water chemistry* // *Science, New Series*. – 1970. – V. 170. – № 3962. – P. 1088–1090.
21. Карпенко Л.В. Характеристика затопленной торфяной залежи и оценка ее влияния на качество воды в Богучанском водохранилище // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. – 2012. – № 2. – С. 80–90.
22. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Tirsikh E.N. Dynamics of trace element composition of bratsk reservoir water in different periods of anthropogenic impact (Baikal Region, Russia) // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2021. – V. 80. – P. 531–545.
23. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2013 году». – Иркутск: Изд-

- во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2014. – 389 с.
24. Gemelgo M.C.P., Mucci J.L.N., Navas-Pereira D. Population dynamics: seasonal variation of phytoplankton functional group in Brazilian reservoir (Bilings and Gaurapiranga, Sao Paulo) // *Brazil Journal of Biology*. – 2009. – V. 69. – № 4. – P. 1001–1013.
 25. Soltero R.A., Wright J.C., Horpestad A.A. Effects of impoundment on the water quality of the Bighorn river // *Water Research*. – 1973. – V. 7. – № 3. – P. 343–354.
 26. Reservoir's impact on the water chemistry of the Teesta river mountain course (Darjeeling Himalaya) / L. Wiejaczka, P. Prokop, R. Kozłowski, S. Sarkar // *Ecological Chemistry and Engineering S.* – 2018. – V. 25. – № 1. – 73–88.
 27. Li S., Ye C., Zhang Q. 11-Year change in water chemistry of large freshwater Reservoir Danjiangkou, China // *Journal of Hydrology*. – 2017. – V. 551. – P. 508–517.
 28. Wetzel R.G. *Limnology: lakes and river ecosystems*. – San Diego: Academic Press, 2001. – 1006 p.
 29. Rashid I., Romshoo S.A. Impact of anthropogenic activities on water quality of Lidder River in Kashmir Himalayas // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2013. – V. 185. – P. 4705–4719.
 30. Wildi W. Environmental hazards of dams and reservoirs // *NEAR curriculum in Natural Environmental Science, Terre & Environment*. – 2010. – V. 88. – P. 199–204.
 31. Bahir M., Ouazar D., Ouhamdouch S. Dam effect on groundwater characteristics from area under semi-arid climate: case of the Zerrar dam within Essaouira basin (Morocco) // *Carbonates and Evaporites*. – 2019. – V. 34. – P. 709–720.
 32. The hydrochemical and isotopic evolution of the surface water and groundwater for impoundment in the Xiluodu Reservoir, Jinsha River, China / Z. Zhou, Z. Zhou, H. Xu, M. Li // *Sustainability*. – 2020. – V. 12. – № 14. – 580.
 33. Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржицинский Ю.Б. Изменение геологической среды в зоне влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 254 с.

Поступила 17.06.2022 г.

Прошла рецензирование 22.06.2022 г.

Информация об авторах

Полетаева В.И., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН; доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 504.455(504.4.062.2)

ANGARA RIVER HYDROCHEMICAL VARIABILITY WHEN BUILDING THE BOGUCHANY RESERVOIR (RUSSIA)

Vera I. Poletaeva^{1,2},
alieva@igc.irk.ru

¹ Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russia.

² Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity of controlling hydrochemical parameters of large freshwater ecosystem for the objective estimation of waterbody transformation under the anthropogenic impact.

The main aim of the research is to examine the spatial and temporal variability in major ion concentrations in Angara River water before regulating its flow by the Boguchany hydropower plants dam, as well as in Boguchany reservoir water during filling and water level stabilization.

Objects of the research are the Angara River before regulating its flow by the Boguchany HPP dam (2007), and Boguchany reservoir during filling (2013, 2014) and water level stabilization (2015, 2017).

Methods. Chemical analyses in the water samples were determined in the Centre for Collective Use «Isotope-Geochemical Research» of the IGC SB RAS (Irkutsk, Russia). Flame emission spectrophotometry was used in the analysis of Na⁺ and K⁺, atomic absorption spectrometry was applied to analyse Ca²⁺ and Mg²⁺, the turbidimetric method was used to measure SO₄²⁻, the titrimetric method was employed in the analysis of HCO₃⁻ and the mercurimetric method was applied to study Cl⁻.

Results. The spatial and temporal variability in the concentrations of cations (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, and K⁺) and anions (HCO₃⁻, SO₄²⁻, and Cl⁻) was examined. The results of the study show that the increase in the water level led to changes in the major ion concentration ratio. In comparison with the Angara River, in the Boguchany reservoir operation, SO₄²⁻, Cl⁻, Na⁺, and Mg²⁺ concentrations increased, while HCO₃⁻ and Ca²⁺ concentrations decreased in the initial period of reservoir operation. The ionic composition of water in the Boguchany reservoir resulted primarily from the contribution from the area located upstream (runoff from the Ust-Ilimsk reservoir). Anthropogenic factors include wastewater and reservoir creation, which affect the hydrochemistry of major ions.

Key words:

monitoring, anthropogenic effects, reservoir filling, hydrochemistry, major ions.

The author is grateful to Mikhail V. Pastukhov and Natalya A. Zagorulko for the help in the field work and commentaries contributing to better comprehension and reasoning of conclusions.

REFERENCES

- Ligon F.K., Dietrich W.E., Trush W.J. Downstream ecological effects of dams. *Bioscience*, 1995, vol. 45, no. 3, pp. 183–192.
- Ghosh S., Guchhait S.K. Hydrogeomorphic variability due to dam constructions and emerging problems: a case study of Damodar River, West Bengal, India. *Environment, Development and Sustainability*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 769–796.
- Dams and development. A new framework for decision-making. The report of World Commission on Dams.* London, Earthscan Publications Ltd, 2005. 448 p.
- Dvoretzkaya M.I., Zhdanova A.P., Lushnikov O.G., Sliva I.V. *Vozobnovlyаемая энергия. Гидроэлектростанции России. Справочник* [Renewable energy. Hydroelectric power plants of Russia. Reference book]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ. house, 2018. 224 p.
- Jaguś A., Rzętała M.A., Rzętała M. Water storage possibilities in Lake Baikal and in reservoirs impounded by the dams of the Angara River cascade. *Environmental Earth Sciences*, 2015, vol. 73, pp. 621–628.
- Verbolova N.V. Formirovanie gidrokhimicheskogo rezhima Bratskogo vodokhranilishcha [Formation of the hydrochemical regime of the Bratsk reservoir]. *Formirovanie planktona i gidrokhimiya Bratskogo vodokhranilishcha* [Formation of plankton and hydrochemistry of the Bratsk reservoir]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1973. pp. 78–119.
- Karnaukhova G.A. Hydrochemistry of the Angara and reservoirs of the Angara cascade. *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 1, pp. 71–79. In Rus.
- Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Zagorulko N.A., Belogolova G.A. Changes in water hydrochemistry in bays of the Bratsk Reservoir caused by forest harvesting operations. *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 3, pp. 369–378. In Rus.
- Strizheva T.A. *Usloviya i osobennosti formirovaniya gidrokhimicheskogo rezhima, sostava i kachestva vod iskusstvennykh vodoemov Vostochnoy Sibiri (na primere Ust-Ilimskogo vodokhranilishcha)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Conditions and features of the formation of the hydrochemical regime, composition and quality of waters of artificial reservoirs in Eastern Siberia (on the example of the Ust-Ilimsk reservoir). Cand. Diss.]. Irkutsk, 1985. 19 c.
- Savichev O.G., Matveenko I.A. Evaluation of chemical composition changes of surface water in Boguchan Reservoir (Siberia, Russia). *Hydrological Sciences Journal*, 2013, vol. 58, no. 3, pp. 706–715.
- Volynchikov A.N. Boguchanskaya GES – puskovoy obyekt rossiyskoy gidroenergetiki [Boguchan HPP-the starting object of the Russian hydropower industry]. *Hydrotechnical construction*, 2010, no. 10, pp. 30–37.
- Boguchanskoe vodokhranilishche. Podzemnye vody i inzhenernaya geologiya territorii* [Boguchany reservoir. Groundwater and engineering geology of the area]. Ed. by M.M. Odintsov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 157 p.
- Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V. Current chemical composition of Lake Baikal water. *Inland Waters*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 250–258.
- Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Doroshkov A.A., Proydakova O.A., Tsydytova S.B. The cyclicity in the changes in the chemical composition of the water source of the Angara River (Baikal Stock) in 2017–2018 in comparison with the last 20 years of data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, 728.

15. Poletaeva V.I., Tirsikh E.N., Pastukhov M.V. Hydrochemistry of sediment pore water in the Bratsk reservoir (Baikal region, Russia). *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, 11124.
16. Poletaeva V.I., Dolgikh P.G., Pastukhov M.V. Osobennosti formirovaniya gidrokhimicheskogo rezhima Ust-Ilimskogo vodokhranilishcha [Features of the formation of the hydrochemical regime of the Ust-Ilimsk reservoir]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2017, no. 10, p. 11–17.
17. Berner E.K., Berner R.A. *Global environmental: water, air and geochemical cycles*. New York, Prentice-Hall, 1996. 376 p.
18. Zhang W., Ma L., Abuduwaili J., Ge Y., Issanova G., Saparov G. Hydrochemical characteristics and irrigation suitability of surface water in the Syr Darya River, Kazakhstan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, 572.
19. Bochkarev P.F. *Gidrokimiya rek vostochnoy Sibiri* [Hydrochemistry of the rivers in Eastern Siberia]. Irkutsk, East Siberian Publishing House, 1959. 156 p.
20. Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science, New Series*, 1970, vol. 170, no. 3962, pp. 1088–1090.
21. Karpenko L.V. Kharakteristika zatoplennoy torfyanoy zalezhi i otsenka ee vliyaniya na kachestvo vody v Boguchanskom vodokhranilishche [The flooded peat deposit characteristic and assessment of its impact upon water quality in the Boguchansk reservoir]. *Vodnoe hozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2012, no. 2, pp. 80–90.
22. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Tirsikh E.N. Dynamics of trace element composition of bratsk reservoir water in different periods of anthropogenic impact (Baikal Region, Russia). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, vol. 80, pp. 531–545.
23. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Irkutskoy oblasti v 2013 godu»* [State report «On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2013»]. Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ. house, 2014. 389 p.
24. Gemelgo M.C.P., Mucci J.L.N., Navas-Pereira D. Population dynamics: Seasonal variation of phytoplankton functional group in Brazilian reservoir (Bilings and Gaurapiranga, Sao Paulo). *Brazil Journal of Biology*, 2009, vol. 69, no. 4, pp. 1001–1013.
25. Soltero R.A., Wright J.C., Horpestad A.A. Effects of impoundment on the water quality of the Bighorn river. *Water Research*, 1973, vol. 7, no. 3, pp. 343–354.
26. Wiejaczka Ł., Prokop P., Kozłowski R., Sarkar S. Reservoir's impact on the water chemistry of the Teesta river mountain course (Darjeeling Himalaya). *Ecological Chemistry and Engineering. S*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 73–88.
27. Li S., Ye C., Zhang Q. 11-Year change in water chemistry of large freshwater reservoir Danjiangkou, China. *Journal of Hydrology*, 2017, vol. 551, pp. 508–517.
28. Wetzel R.G. *Limnology: lakes and river ecosystems*. San Diego, Academic Press, 2001. 1006 p.
29. Rashid I., Romshoo S.A. Impact of anthropogenic activities on water quality of Lidder River in Kashmir Himalayas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, vol. 185, pp. 4705–4719.
30. Wildi W. Environmental hazards of dams and reservoirs. *NEAR curriculum in Natural Environmental Science, Terre & Environment*, 2010, vol. 88, pp. 199–204.
31. Bahir M., Ouazar D., Ouhamdouch S. Dam effect on groundwater characteristics from area under semi-arid climate: case of the Zerzar dam within Essaouira basin (Morocco). *Carbonates and Evaporites*, 2019, vol. 34, pp. 709–720.
32. Zhou Z., Zhou Z., Xu H., Li M. The hydrochemical and isotopic evolution of the surface water and groundwater for impoundment in the Xiluodu Reservoir, Jinsha River, China. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 14, 5805.
33. Ovchinnikov G.I., Pavlov S.Kh., Trzhitsinsky Yu.B. *Izmenenie geologicheskoy sredy v zone vliyaniya Angaro-Eniseyskikh vodokhranilishch* [Changes in the geological environment in the zone of influence of the Angara-Yenisei reservoirs]. Novosibirsk, Siberian Publishing Company of the Russian Academy of Sciences, 1999. 254 p.

Received: 17 June 2022.

Reviewed: 22 June 2022.

Information about the authors

Vera I. Poletaeva, Cand. Sc., senior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS; associate professor, Irkutsk National Research Technical University.