

УДК 556.555 (571.53)

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(119-126)

В.И. ПОЛЕТАЕВА, М.В. ПАСТУХОВ, Э.Н. ТИРСКИХИнститут геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия, alieva@igc.irk.ru, mpast@igc.irk.ru, etirskikh@igc.irk.ru**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОВЫХ ВОД
ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВЕРХНЕГО УЧАСТКА БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

Изучен химический состав поровых вод донных отложений и вод верхней части Братского водохранилища на различном удалении от техногенных источников. В различных горизонтах поверхностных и поровых вод определены концентрации HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также их окислительно-восстановительные и кислотно-щелочные характеристики. Установлено, что окислительная среда, характерная для воды Братского водохранилища, сохраняется в донных отложениях только в верхнем слое (0,5 см), далее сменяется восстановительной по всей толще осадка. Распределение основных ионов в свободных водах водохранилища равномерно по всей акватории водоема, за исключением участков непосредственного поступления сточных вод. В поровых водах донных отложений концентрации всех исследуемых компонентов значительно выше, что особенно выражено на участках максимального осадкообразования – в наиболее техногенно нагруженной зоне и заливе водохранилища. Различия химического состава поровых вод и воды водохранилища связаны с резким увеличением концентраций Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , что особенно выражено для средних и нижних слоев донных осадков. Для воды водохранилища средняя минерализация равна 113,2 мг/л, для поровых вод она достигает 5012 мг/л. Послойный анализ поровых вод выявил значительную неоднородность их химического состава. Распределение основных ионов в поровой воде донных отложений определяется составом вод, масштабами и временем техногенного воздействия, подтоком подземных вод, составом водовмещающих пород, гидрологическим режимом, а также процессами раннего диagenеза.

Ключевые слова: главные ионы, донные отложения, поверхностные воды, источники поступления, химия воды.

V.I. POLETAEVA, M.V. PASTUKHOV, E.N. TIRSKIKHVinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Favorskogo, 1a, Russia, alieva@igc.irk.ru, mpast@igc.irk.ru, etirskikh@igc.irk.ru**CHARACTERISTICS OF PORE-WATER CHEMICAL COMPOSITION IN BOTTOM SEDIMENTS
OF THE UPPER PART OF THE BRATSK RESERVOIR**

A study is made of the chemical composition of pore water in bottom sediments and water in the upper part of the Bratsk reservoir (BR) at a different distance from anthropogenic sources. Concentrations of HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and their oxidation-reduction and acid-alkaline characteristics have been measured in different aquifers of surface and pore water. It was established that the oxidizing medium typical for the water of BR persists only in the upper layer of bottom sediments (0.5 cm) and is replaced by the reducing medium throughout the layer of bottom sediments. Basic ions are distributed evenly in the free waters of BR, except for the areas with direct inflow of wastewater. Concentrations of all studied components are considerably higher in pore water of bottom sediments, which is particularly clearly pronounced in zones of intense sedimentation, i. e. in the zones with the most severe anthropogenic load and the reservoir bay. Differences in the chemical composition of pore water and reservoir water are associated with an abrupt increase in Cl^- , SO_4^{2-} and Na^+ concentrations, which is particularly evident in the middle and lower layers of bottom sediments. With the mineralization in the waters of BR averaging 113,2 mg/L, its value in pore water reaches 5012 mg/L. Layer-by-layer analysis of pore water showed a considerable heterogeneity of its chemical composition. The distribution of basic ions in the pore water of bottom sediments is determined by water composition, the magnitude and time of anthropogenic impact, groundwater input, composition of water-bearing rocks, hydrological regime as well as by processes of early diagenesis.

Keywords: basic ions, bottom sediments, surface water, sources of input, water chemistry.

ВВЕДЕНИЕ

Длительное техногенное воздействие на водные экосистемы приводит к образованию зон с высокой степенью загрязнения потенциально токсичными элементами, депонированными в донных

отложениях [1–3]. Дальнейшие преобразования загрязняющих веществ в донных осадках зависят от гидродинамического режима, химического и минералогического состава отложений, рН, Eh, количества органического вещества и т. д. [4–6].

К наиболее крупным антропогенным преобразованиям р. Ангары относится создание каскада ГЭС. На экологические проблемы, связанные с зарегулированием стока реки, накладывается техногенная нагрузка от городских и промышленных агломераций, расположенных на ее побережье. Наиболее масштабной экологической проблемой Приангарья является длительное поступление загрязняющих веществ с предприятия «Усольехимпром» в Ангару и Братское водохранилище (БВ), второе в Ангарском каскаде ГЭС. Вынос элементов техногенного происхождения можно условно оценить по данным [7] в период спада техногенной нагрузки (2000 г.), в течение которого со сточными водами Усоля-Сибирского в водные объекты только за один год поступило 3000 т сульфатов, 4734 т хлоридов и других веществ. В настоящее время техногенная нагрузка значительно снижена, однако определено [8, 9], что поступающие в водоем элементы техногенного происхождения переносились со взвесью и накапливались в зоне максимального осадконакопления БВ, создавая зону наибольшего загрязнения. При определенных гидрологических и геохимических условиях загрязненные донные отложения могут стать мощным источником вторичного поступления депонированных элементов в водную среду. Для определения процессов, контролирующих закрепление или высвобождение из донных осадков чуждых природным экосистемам элементов, необходимо установить их миграционные способности в системе вода–донные отложения. Поэтому чрезвычайно важным становится изучение химического состава поровых вод, обеспечивающих возможность массообменных потоков.

Несмотря на большой объем данных по содержанию элементов в воде и донных отложениях БВ [8–12], химическому составу поровых вод уделено недостаточно внимания. Такого рода исследования были проведены в 1980-е гг. [13] и включали определение основных катионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) и биогенных компонентов (NO_3^- , SiO_2^- , PO_4^{3-}) порового раствора. Отсутствие информации о концентрации главных ионов в поровых водах донных отложений Ангары и ее водохранилищ затрудняет точную оценку последствий техногенного воздействия. В связи с этим цель работы — изучение основного ионного состава поровых вод донных отложений БВ в зависимости от гидрологических и гидрохимических условий.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Участок водоема от Усоля-Сибирского до Свирска, предприятия которых — основные поставщики элементов техногенного происхождения, является зоной переменного подпора БВ. По данным профильного отбора донных отложений установлено, что аккумуляция осадочного материала в БВ начинает проявляться на участке в 3 км выше Свирска. Механическое осаждение большей части взвеси и активное накопление осадочного материала, связанные с падением транспортирующей способности водного потока при переходе от речного режима к режиму водохранилища и со спецификой морфологии ложа водоема, приводит к образованию в 10 км ниже Свирска зоны с наибольшей скоростью седиментации, где, по данным [8], осаждается значительная часть поллютантов. Точки (станции) отбора проб воды и поровых вод донных отложений верхнего участка БВ (т. БВ-1–БВ-4) в августе 2017 г. показаны на рис. 1. Точка наблюдения зоны наибольшего осадконакопления БВ соответствует т. БВ-1. Ниже по течению, в районе дер. Молька (т. БВ-2) и пос. Игжей (т. БВ-3), мощность донных осадков уменьшается, также снижается и уровень техногенной нагрузки. В заливе Талькино (т. БВ-4) скорость осадконакопления сопоставима со скоростью в т. БВ-1. Однако в него не поступают основные потоки воды с взвешенными частицами, переносимыми веществами техногенного происхождения.

Отбор проб вод БВ проведен батометром Ocean Test 110А с двух горизонтов: поверхностного (с глубины 0,6 м) и придонного (в метровом слое от дна). Донные отложения отобраны трубкой ГОИН-1. Все извлеченные керны включали в себя первичные грунты, что позволило выделить осадочные образования, сформированные в период функционирования водохранилища. В донных отложениях в т. БВ-1, помимо илистого материала в кернах, особенно в нижних слоях, присутствует песок. В донных отложениях в т. БВ-4 зафиксировано большое количество органических остатков. В отобранных кернах донных отложений окислительный слой составлял 0,5 см. Весь нижележащий осадок — это илы темно-серого, почти черного, цвета, указывающие на наличие восстановительных условий.

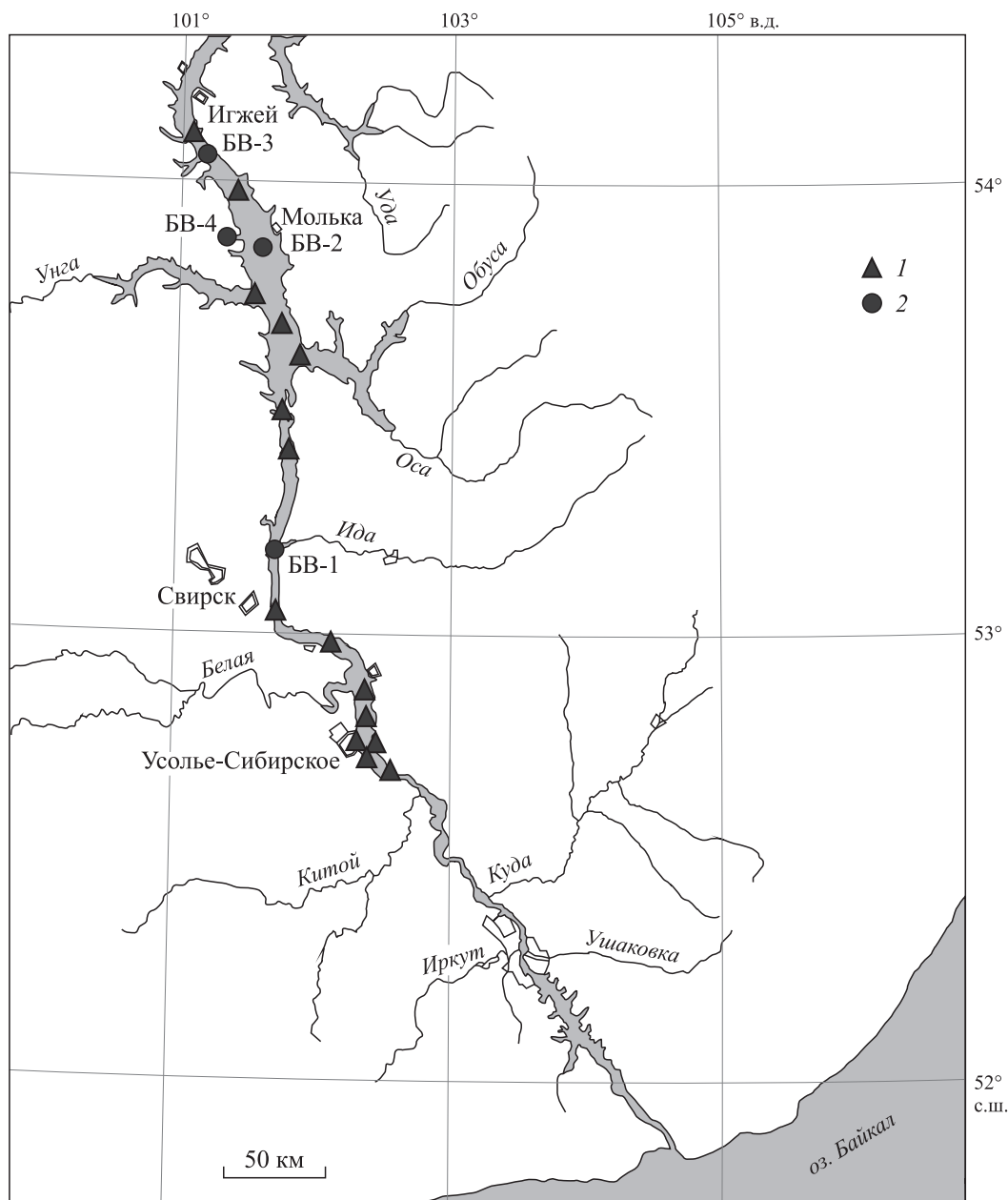


Рис. 1. Карта-схема отбора проб в верхней части Братского водохранилища.

Станции отбора проб: 1 — воды Братского водохранилища, 2 — воды Братского водохранилища и поровых вод (БВ-1–БВ-4).

Поровые воды извлечены из кернов донных отложений, разделенных на слои, в зависимости от полученных ранее данных по накоплению в них химических элементов. В т. БВ-1 выделены слои — 0–10 см, 10–30, 30–50, 50–86, в т. БВ-2 — 0–17, 17–34, в т. БВ-3 — 0–9, 9–17, в т. БВ-4 — 0–20, 20–45, 45–70 см. Выделение поровых вод проводилось путем отжима донных отложений центрифугированием, при скорости 5 тыс. об/мин.

В полевых условиях определены рН, Eh вод. В пробах поровых вод и вод БВ, отфильтрованных через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм, при помощи стандартных методик [14] установлено содержание главных ионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Химический анализ проведен с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии СО РАН (Иркутск).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водная среда БВ по величине рН слабощелочная или нейтральная. В воде фиксируются высокие концентрации O_2 , количество взвешенных веществ невысоко (табл. 1). Наименьшие концентрации O_2 определены в придонных водах в точках БВ-2 и БВ-3. Показатель Eh в воде БВ свидетельствует об окислительных условиях среды. В поровых водах верхних слоев донных отложений значение Eh составляет -80 мВ, с глубиной снижается до -270 мВ. Величина рН поровых вод изменяется по керну в небольшом интервале — от 7,10 до 7,64.

Основной ионный состав вод руслового участка БВ характеризуется незначительными изменениями минерализации (см. табл. 1) с преобладанием HCO_3^- и Ca^{2+} , что согласуется с данными для Ангары в целом [10, 15]. Исключением являются участки смешения сточных вод промышленной зоны Усоля-Сибирского и вод БВ, на которых минерализация повышается до 165 мг/л. По сравнению с водами БВ, поровые воды донных отложений более обогащены элементами основного ионного состава. Вертикальное распределение главных ионов в поровых растворах крайне неоднородно (рис. 2). Соотношение анионов в водах БВ и поровых водах верхнего слоя донных осадков сходно между собой: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$, за исключением поровых вод в т. БВ-4, в которых доминирует SO_4^{2-} . Соотношение катионов в поровых водах в точках БВ-2 и БВ-3, как и в воде БВ, следующее: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$, в поровых водах в точках БВ-1 и БВ-4 оно изменяется на $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$.

Существенные различия наблюдаются в основном ионном составе поровых вод на участках БВ с разной скоростью осадкообразования. Снижение концентрации HCO_3^- от верхних слоев осадка к нижним наблюдается в точках БВ-1 и БВ-2 (см. рис. 2). Причем в т. БВ-1 его концентрация в нижнем слое донных отложений уменьшается вплоть до величин, свойственных воде БВ. Концентрации остальных главных ионов в глубь керна, напротив, возрастают (см. рис. 2), начиная с поверхностного слоя осадков, и еще более заметно — в средних и нижних слоях керна. Наименьшие значения минерализации фиксируются в т. БВ-3, максимальные — в т. БВ-4. Трансформация гидрокарбонатных кальциевых вод БВ отмечена уже в верхних слоях донных осадков (табл. 2).

Концентрации Cl^- и SO_4^{2-} в воде истока Ангары составляют 0,6 и 5,86 мг/л соответственно [15]. Повышение их содержания в воде верхнего участка БВ (см. табл. 1) обусловлено особенностями геологического строения Сибирской платформы, сложенной морскими кембрийскими отложениями [17]. Увеличение концентраций Cl^- и Na^+ в воде Ангары на участке переменного подпора БВ связано с зарегулированием стока реки, при котором усилилось влияние гидрогеохимического купола в результате его подъема к поверхности [18]. Техногенное влияние на трансформацию основного ионного состава вод БВ выражается в поступлении значительных количеств Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} со сточными водами промзоны Усоля-Сибирского [12].

Для выявления геохимических особенностей распределения главных ионов в поровых водах донных отложений БВ было проведено сравнение с водоемами, обладающими различной степенью солености. Так, концентрации Cl^- в поровых и свободных водах Каспийского моря близки между собой и связаны друг с другом в пространстве [19]. Переходная зона морских и пресных вод изучена на профиле р. Енисей–Карское море, где в поровых водах поверхностных слоев осадков закономерно растут

Таблица 1

Гидрохимические параметры поверхностных вод русловой части Братского водохранилища

Параметр	Минимум	Максимум	Среднее
рН	6,4	8,6	7,6
Eh, мВ	+161	+321	+268
Содержание, мг/л:			
O_2	8,4	12,0	10,8
HCO_3^-	66,9	78,6	72,7
Cl^-	1,6	4,2	2,8
SO_4^{2-}	7,4	13,7	10,2
Ca^{2+}	14,1	20,7	17,1
Mg^{2+}	2,9	7,8	4,8
Na^+	3,2	5,0	4,1
K^+	0,84	1,14	1,06
Минерализация, мг/л	105,1	126,0	113,2

концентрации Cl^- по направлению от устья реки к открытому морю [20]. Наиболее близок для сравнения состав вод оз. Байкал, обеспечивающего основной объем поступающих в водохранилища Ангарского каскада поверхностных вод. Изучение пелагической зоны оз. Байкал с регулярными скоростями седиментации [21] показало, что в низкоминерализованной поровой воде, как и в воде озера, преобладает бикарбонат кальция. Согласно результатам исследований различных водоемов, распределение главных ионов в поровых водах донных отложений, особенно в верхнем слое, напрямую зависит от их концентраций в водной толще.

Наиболее близка к составу вод БВ (см. табл. 1, см. рис. 2) поровая вода верхнего слоя донных отложений в т. БВ-3, расположенной на максимальном удалении от источников загрязнения. Несмотря на то что ионный состав вод руслового участка

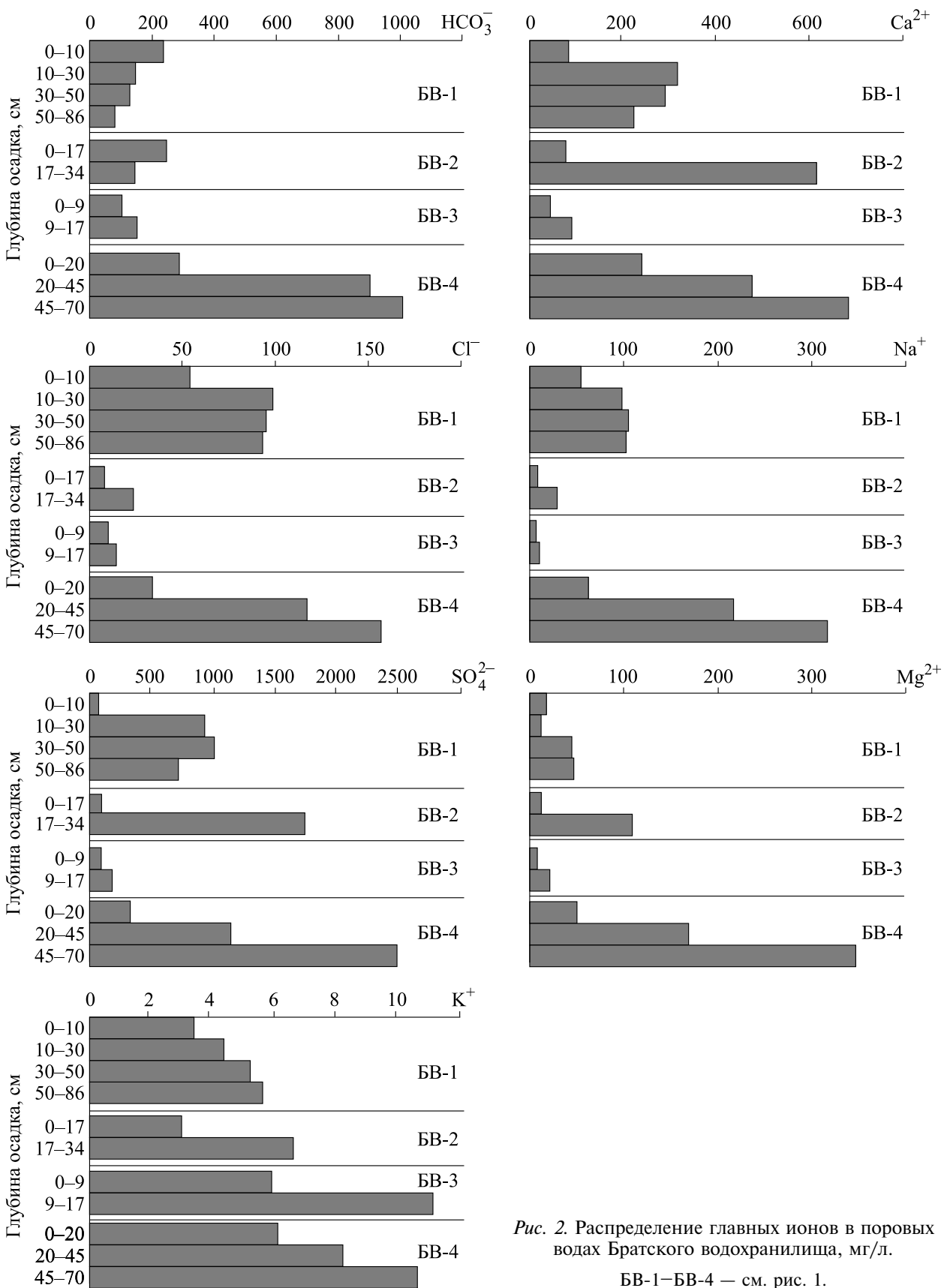


Рис. 2. Распределение главных ионов в поровых водах Братского водохранилища, мг/л.
БВ-1–БВ-4 — см. рис. 1.

Классификация поровых вод Братского водохранилища

Место отбора проб	Глубина отбора, см	Химический состав*	Место отбора проб	Глубина отбора, см	Химический состав*
БВ-1	0–10	$M_{525} \frac{HCO_3 56}{Ca 50 Na 29}$	БВ-2	0–17	$M_{462} \frac{HCO_3 65 SO_4 32}{Ca 69}$
	10–30	$M_{1607} \frac{SO_4 79}{Ca 73}$		17–34	$M_{2668} \frac{SO_4 92}{Ca 74}$
	30–50	$M_{1677} \frac{SO_4 81}{Ca 62}$			
	50–86	$M_{1272} \frac{SO_4 79}{Ca 56}$			
БВ-3	0–9	$M_{283} \frac{SO_4 50 HCO_3 43}{Ca 62 Mg 25}$	БВ-4	0–20	$M_{1020} \frac{SO_4 55 HCO_3 38}{Ca 62}$
	9–17	$M_{486} \frac{SO_4 57 HCO_3 37}{Ca 62 Mg 27}$		20–45	$M_{3035} \frac{SO_4 57 HCO_3 35}{Ca 50 Mg 30}$
45–70				$M_{5012} \frac{SO_4 71}{Ca 44 Mg 37}$	

* Использована формула Курлова. К преобладающим ионам отнесены ионы, количества вещества-эквивалента которых выше 25 % [16].

БВ не подвержен значимым вариациям (см. табл. 1), состав поровых вод верхних горизонтов существенно отличается от такового на остальных точках наблюдений. Можно предположить, что на состав поровых вод определенное влияние оказали техногенные нагрузки, максимум которых приходится на 1980–1990 гг. Накопление Cl^- , Na^+ и SO_4^{2-} в поровых водах средних и нижних слоев керна в точках БВ-1 и БВ-2 соответствует периоду наиболее интенсивной работы предприятий. Результаты, полученные в период спада деятельности «Усольехимпром» (2007–2010 гг.), показали, что в 10 км вниз по течению от источника загрязнения концентрации главных ионов, кроме Cl^- и Na^+ , приближались к уровню фоновых значений [12]. В связи с этим уменьшение концентраций элементов в поровых водах верхнего слоя донных отложений указывает не только на взаимосвязь поровых и поверхностных вод, но и на спад техногенной нагрузки в последние десятилетия. Вместе с тем в пределах аномальных участков оз. Байкал накопление иона Cl^- в поровых водах связано с тектоническими разломами, по которым он поступает в донные осадки [22]. Поэтому помимо техногенного фактора на обогащение поровых вод в т. БВ-1 ионами хлора и натрия существенное влияние могут оказывать минерализованные напорные воды, разгружающиеся в ложе и борта водоема после зарегулирования Ангары.

Потенциальный источник элементов в поровых водах, особенно в начальный период функционирования водохранилища, — терригенный материал, поступающий в процессе разрушения горных пород и абразии берегов. Формирование донных отложений в точках БВ-1 и БВ-2 происходит в зоне распространения сульфатных пород [23], высокая растворимость которых влияет на концентрацию SO_4^{2-} в поровой воде. Поступление SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Mg^{2+} (см. рис. 2) в поровые воды в точках БВ-1 и БВ-2, особенно в нижних и средних слоях керна, связано с разрушением, растворением и выносом осадочного материала с водосборных площадей притоков водохранилища — рек Унги и Иды. В бассейне этих рек широко распространены карбонатные и сульфатно-карбонатные породы нижнего кембрия — доломиты, известняки, ангидриты, гипсы. Влияние сульфатных кальциевых вод р. Унга на гидрохимический состав залива Унга БВ определено в [24]. Вместе с тем на верхнем участке БВ образование донных осадков происходит в основном за счет терригенного материала, поступающего в составе стока Ангары и ее притоков — Иркуты, Китоя и Белой [25]. По нашим данным, во взвешенном веществе и донных отложениях от Свирска до дер. Моляка доминирует терригенный материал алюмосиликатного состава. Концентрации элементов во взвеси и донных осадках близки между собой и составляют в среднем для CaO — 6,04 %, Fe_2O_3 — 6,76, MgO — 5,46, K_2O — 1,8, Na_2O — 1,55, TiO_2 — 0,71, P_2O_5 — 0,31, S — 0,18, MnO — 0,13, Cl — 0,05 %. Привнесение новых порций оседающего взвешенного материала определяет меньшие концентрации главных ионов, кроме гидрокарбонат-иона, в поровых водах верхнего слоя донных отложений (см. рис. 2).

На формирование донных отложений в т. БВ-3 влияют алевроитово-песчаниковые породы верхнего кембрия и четвертичные делювиально-аллювиальные отложения, слагающие берега БВ ниже залива Унга [23]. В наименьшем по мощности керне донных отложений невысокие концентрации главных ионов в поровых водах указывают на то, что в процессе седиментации формируется поглощающий комплекс, наиболее близкий к составу вод БВ.

Гидрологические параметры залива (т. БВ-4) не способствуют значительному выносу поверхностного материала в русловую часть, что создает зону высокого осадконакопления. Здесь источником повышенных концентраций элементов основного ионного состава могут быть почвообразующие породы — красноцветные верхнекембрийские отложения, а также сильно размываемая дерново-карбонатная почва с высоким содержанием кальцита и карбонатов [13]. Отметим, что сравнение поровых вод в т. БВ-4 и подземной воды близлежащей скважины (глубина 20 м) показало их родственный химический состав. Это свидетельствует о том, что компоненты ионно-солевого состава поступают в поровые воды залива преимущественно за счет выщелачивания вмещающих пород. Определенная часть SO_4^{2-} , Cl^- и Na^+ в поровых водах может иметь сложный генезис, включающий их поступление через зоны повышенной проницаемости в трещинах в бортах долины водоема.

Важной особенностью изменения состава поровых вод являются диагенетические преобразования [26], раннюю стадию которых в БВ можно определить по данным визуальных наблюдений и показателю Eh. В отличие от достаточно устойчивого Cl^- , содержание SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} и HCO_3^- в поровых водах БВ изменчиво в зависимости от окислительно-восстановительных условий (см. рис. 2). Ранние процессы диагенеза проявляются в верхних слоях донных отложений, в поровой воде которых наблюдаются пониженные концентрации SO_4^{2-} , за счет их восстановления до H_2S (HS^-), и Ca^{2+} , вследствие образования труднорастворимых карбонатов CaCO_3 . Щелочность раствора в этих слоях, напротив, повышена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поровые воды донных отложений, в отличие от вод БВ, характеризуются неоднородностью основного ионного состава. Накопление основных ионов в поровых водах различается как по акватории водоема, так и по глубине донных отложений. Формирование химического состава поровых вод происходит в результате сложного взаимодействия природных и техногенных процессов, протекающих на водосборной площади в течение всего периода существования водохранилища. На участке БВ с наибольшей скоростью седиментации концентрации главных ионов в поровых водах больше, чем в других точках руслового участка. Однако максимальные концентрации главных ионов фиксируются в поровых водах донных отложений залива, отличающегося от руслового участка БВ более низким водообменом. Важными факторами, влияющими на концентрацию главных ионов в поровых водах донных отложений БВ, являются состав водовмещающих пород и поступление высокоминерализованных подземных вод.

Полученный фактический материал позволит более обоснованно подойти к рассмотрению процессов, протекающих в осадках, и оценить возможность накопления элементов в донных отложениях или их вторичного поступления в поверхностные воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16-05-00891-а) и в рамках программы фундаментальных научных исследований (IX.127.1.4. № 0350-2019-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bravo A.G., Loizeau J.L., Ancey L., Ungureanu V.G., Dominik J.** Historical record of mercury contamination in sediments from the Babeni Reservoir in the Olt River, Romania // Environmental Science and Pollution Research. — 2009. — Vol. 16 (1). — P. 66–75.
2. **Wiener J.G., Sandheinrich M.B.** Contaminants in the Upper Mississippi River: historic trends, responses to regulatory controls, and emerging concerns // Hydrobiologia. — 2010. — Vol. 640. — P. 49–70.
3. **Zheng B., Yanwen Q., Zhang Q.L., Ma Y., Zhao Y., Wen Q.** Sixty-year sedimentary records of polymetallic contamination (Cu, Zn, Cd, Pb, As) in the Dahuofang Reservoir in Northeast China // Environmental Earth Sciences. — 2016. — Vol. 75 [Электронный ресурс]. — <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-015-5160-6> (дата обращения 30.09.2018).

4. Манихин В.И., Никаноров А.М. Растворенные и подвижные формы тяжелых металлов в донных отложениях пресноводных экосистем. — СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — 182 с.
5. Korfali S.I., Davies B.E. Speciation of metals in sediment and water in a river underlain by limestone: role of carbonate species for purification capacity of rivers // *Advances in Environmental Research*. — 2004. — Vol. 8, issue 3–4. — P. 599–612.
6. Zheng G.D., Kuno A., Evans D.J., Mahdi T.A., Miyahara M., Takahashi Y., Matsuo M., Shimizu H. Iron speciation and mineral characterization of contaminated sediments by coal mining drainage in Neath Canal, South Wales, UK // *Geochemical Journ.* — 2007. — Vol. 41, N 6. — P. 463–474.
7. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 2000 г.». — Иркутск: Облмашинформ, 2001. — 383 с.
8. Алиева В.И., Бутаков Е.В., Пастухов М.В., Андрулайтис Л.Д. Особенности техногенного загрязнения и формы переноса ртути в Братском водохранилище // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. — 2011. — № 5. — С. 431–438.
9. Коваль П.В., Калмычков Г.В., Лавров С.М., Удодов Ю.Н., Бутаков Е.В., Файфилд Ф.В., Алиева В.И. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме Братского водохранилища // *Докл. АН*. — 2003. — Т. 388, № 2. — С. 225–227.
10. Карнаухова Г.А. Гидрохимия Ангары и водохранилищ Ангарского каскада // *Водные ресурсы*. — 2008. — Т. 35, № 1. — С. 72–80.
11. Алиева В.И., Ломоносов И.С., Гребенщикова В.И. Динамика поступления техногенных микроэлементов в воды Братского водохранилища // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. — 2009. — № 3. — С. 241–247.
12. Алиева В.И., Пастухов М.В. Гидрохимическая характеристика р. Ангары в районе влияния Усольского промышленного узла // *География и природ. ресурсы*. — 2012. — № 1. — С. 68–73.
13. Серышев В.А. Субаквальный диагенез почв и классификация аквапитоземов. — Иркутск: Изд-во Ирк. ун-та, 2017. — 247 с.
14. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. А.Д. Семёнова. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 540 с.
15. Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Гапон А.Е., Склярова О.А., Чернигова С.Е. Гидрохимические характеристики поверхностного стока озера Байкал (1997–2003 гг.) // *Докл. АН*. — 2005. — Т. 401, № 5. — С. 663–665.
16. Никаноров А.М. Гидрохимия. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 351 с.
17. Бочкарёв П.Ф. Гидрохимия рек Восточной Сибири. — Иркутск: Кн. изд-во, 1959. — 156 с.
18. Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б. Изменение геологической среды в зонах влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. — Новосибирск: Наука, 1999. — 254 с.
19. Брезунов В.С., Ферронский В.И. Макро- и микроэлементы в поровых водах глубинных областей Южного и Среднего Каспия // *Водные ресурсы*. — 2010. — Т. 37, № 6. — С. 700–708.
20. Леин А.Ю., Миллер Ю.М., Намсараев Б.Б., Павлова Г.А., Пименов Н.В., Русанов И.И., Саввичев А.С., Иванов М.В. Биогеохимические процессы цикла серы на ранних стадиях диагенеза осадков на профиле река Енисей–Карское море // *Океанология*. — 1994. — Т. 34, № 5. — С. 681–692.
21. Pogodaeva T.V., Lopatina I.N., Khlystov O.M., Egorov A.V., Zemskaia T.I. Background composition of pore waters in Lake Baikal bottom sediments // *Journ. of Great Lakes Research*. — 2017. — N 43. — P. 1030–1043.
22. Мизандронцев И.Б. К геохимии поровых растворов // *Динамика байкальской впадины*. — Новосибирск: Наука, 1975. — С. 203–230.
23. Братское водохранилище. Инженерная геология территории / Отв. ред. М.М. Одинцов. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 275 с.
24. Загорюлько Н.А., Полетаева В.И. Динамика гидрохимического состава малых притоков верхней части Братского водохранилища // *Изв. СО Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. — 2016. — № 3 (56). — С. 112–124.
25. Карнаухова Г.А. Литологический состав донных осадков в барьерной зоне «река–водохранилище» (на примере Братского водохранилища) // *Изв. Ирк. ун-та. Сер. Науки о Земле*. — 2015. — Т. 13. — С. 78–87.
26. Verner R.A. *Early Diagenesis: A Theoretical Approach*. — New York: Princeton University Press, 1980. — 241 p.

Поступила в редакцию 13.06.2018

После доработки 31.10.2018

Принята к публикации 25.12.2019