

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ ОЗЕРА ГУСИНОЕ (БУРЯТИЯ)

© 2022 г. Б. В. Дампилова^а, *, З. И. Хажеева^а, А. М. Плюснин^а

^аГеологический институт СО РАН, ул. Сахьяновой, ба, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: bdampilova@geo.stbur.ru

Поступила в редакцию 20.02.2020 г.

После доработки 07.07.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

В работе представлены результаты исследования уровня загрязнения донных отложений озера Гусиное подвижными формами тяжелых металлов (кадмий, хром, медь, цинк, свинец). В результате проведенных работ выделены обменная, восстанавливаемая и окисляемая формы нахождения элементов в донных отложениях озера Гусиное, отобранных в его центральной части и в местах впадения основных рек и водного стока с ГРЭС, очистных сооружений города Гусиноозерск и отвалов Холбоьджинского угольного разреза. Анализ полученных результатов выявил, что для Ni, Cr, Mn, Fe общим свойством является их нахождение в донных отложениях в труднодоступной форме и в адсорбированном виде на поверхности гидроксидов железа, марганца и алюминия. Представляет угрозу для экологического состояния озера высокое содержание биологически доступных форм Cu, Zn, Pb в р. Загустай и Цаган-Гол. Фракционирование форм тяжелых металлов в районе ликвидированного источника загрязнения, связанного со сбросами вод с Холбоьджинского угольного разреза, показало, что содержание тяжелых металлов, прочно связанных с матрицей образца, выше обменной фракции элементов.

Ключевые слова: подвижные формы, тяжелые металлы, экстрагирование, донные отложения

DOI: 10.31857/S0016752522010034

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Гусиное является крупнейшим пресноводным водоемом Забайкалья. Озерная вода используется для водоснабжения города Гусиноозерск и других населенных пунктов, расположенных на побережье, и применяется в качестве охладителя на Гусиноозерской ГРЭС. Озеро имеет большое рыбохозяйственное значение, здесь функционирует рыбозаводный завод по воспроизводству ценных пород рыб. Используется озеро и в рекреационных целях.

Водная система оз. Гусиного формируется за счет притока поверхностных и подземных вод. Основными притоками поверхностных вод являются река Цаган-Гол, впадающая в озеро на юго-западе, и река Загустай, впадающая в водоем на северо-востоке. В западной и северной части в озеро впадают небольшие ручьи Муртой, Нарин-Горхон, Сильве, Бараты, Ельник и Телья. Вытекает из озера единственная река Баин-Гол, являющаяся левым притоком р. Селенги. Кроме этого в озеро происходит разгрузка подземных вод, в основном в виде подруслового стока рек и временных водотоков, дренирующих Хамбинский и Моностойский хребты (Pisarsky et al., 2005).

В связи с возросшей техногенной нагрузкой экологическое состояние оз. Гусиного в последние десятилетия вызывает опасения, поскольку прибрежная часть водоема со всех сторон подвергается антропогенному воздействию. Так, вдоль всего западного побережья озера располагается железная дорога с четырьмя станциями Загустай, Бараты, Муртой и Гусиное озеро. В течение 40 лет в оз. Гусиное сбрасывались шахтные и карьерные воды Холбоьджинского угольного разреза, расположенного на востоке от водоема. В настоящее время наблюдаются сезонные стоки шахтных вод с законсервированного в 2000 году угольного месторождения. Загрязнение озера в северной части происходит вследствие поступления сточных вод жилищно-коммунального хозяйства г. Гусиноозерск. Кроме того, наблюдается аэротехногенное загрязнение территории водосбора атмосферными выбросами ГРЭС (Хажеева, Плюснин, 2018). Со времени начала строительства Гусиноозерской ГРЭС и промышленной разработки Холбоьджинского угольного разреза произошел рост минерализации воды (Ширеторова и др., 2017).

В настоящей работе впервые определены содержания и формы нахождения меди, цинка, хрома, свинца, никеля, железа, марганца в донных

отложениях водной системы озера Гусино по методу последовательного экстрагирования химических элементов в статическом режиме с использованием стандартного образца

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДЫ ОЗЕРА

Ранее довольно подробно исследовано техногенное влияние на гидрохимический режим оз. Гусино. Показано, что большое влияние на химический состав воды озера оказывают коммунально-бытовые стоки и сбросы предприятий угледобывающей промышленности. С развитием промышленности и увеличением количества проживающего на его берегах населения произошел заметный рост в воде содержаний загрязняющих веществ, в первую очередь, таких как сульфат-ион, соединения азота, фосфора, органических веществ (Борисенко и др., 1994; Хажеева, Плюснин, 2018). Установлено, что в северной части водоема в водной толще с возрастанием концентрации главных ионов заметно возрастает концентрация элементов (Mn, Fe, Cu, Zn) на фоне незначительного повышения концентрации остальных микроэлементов. Неравномерное распределение микроэлементов по акватории озера отмечено авторами работ (Гуржапов и др., 2017; Павлов и др., 2017). Так, максимальные концентрации Zn, Cu и Mn фиксировались в северо-западной части водоема вблизи Гусиноозерской ГРЭС и в юго-западной части у железнодорожной станции Гусиное озеро. Концентрация цинка возрастала в районе ГРЭС до 13 ПДК, в районе железнодорожной (ЖД) станции до 7 ПДК, по меди в районе ГРЭС — до 2.6 ПДК, в районе ЖД станций — до 2.4 ПДК. Максимальное содержание марганца фиксировалось непосредственно в районе сброса очистных сооружений г. Гусиноозерска (10 ПДК) и пос. Гусиное озеро (1.5 ПДК), в остальных пробах его концентрация не превышала значений ПДК. Согласно гигиеническому нормативу (Гигиенические нормативы, 2003) предельно допустимые концентрации в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования для цинка и меди составляет 1 мг/л, для марганца 0.1 мг/л. Сравнение полученных данных с ПДК_{рбхз}, (Приказ Минсельхоза России ..., 2016) выявило, что в целом по акватории озера содержание железа и марганца не превышали значений и находились в пределах 0.019–0.049 мг/л и 0.001–0.015 мг/л соответственно. Превышение ПДК_{рбхз} в 10 раз по марганцу, в 2.7 раза по цинку наблюдалось в районе сброса очистных сооружений г. Гусиноозерск. Содержание цинка и меди в акватории озера составило 0.002–0.134 мг/л и 0.0003–0.0026 мг/л соответственно.

Грунтовые воды, разгружающиеся в озеро на территории размещения вскрышных пород уголь-

ных месторождений, имеют повышенное относительно фона содержание сульфат-иона. Его содержание в среднем составляет 587 мг/л (5.9 ПДК_{рбхз}), в отдельных пробах достигая граммовых значений. В грунтовых водах обнаружены очень высокие содержания фторид-иона. Максимальная концентрация этого аниона достигает 27.5 мг/л, в среднем составляет 6.1 мг/л (122 ПДК_{рбхз}). Максимальное содержание в пробах железа 164.9 мг/л, в среднем 35.3 мг/л (353 ПДК_{рбхз}) (Плюснин и др., 2015). Сравнительный анализ микроэлементного состава воды на разных глубинах оз. Гусино (Цыдыпов и др., 2017) показал, что максимальные концентрации элементов наблюдаются в придонном слое.

Таким образом, проведенный литературный обзор выявил достаточно полное исследование гидрохимического состава поверхностной, придонной воды и водной толщи оз. Гусино. Выявлены основные источники загрязнения данной акватории. При этом не было проведено исследований химического состава донных отложений и форм нахождения элементов загрязнителей. По сравнению с водным слоем, донные осадки накапливают загрязняющие вещества в виде органических и неорганических соединений. Донные осадки выступают в качестве природных сорбентов и очищают водную среду. Однако при определенных условиях токсичные и загрязняющие вещества вновь могут переходить в водную толщу, вызывая ее вторичное загрязнение (Решетняк, Закруткин, 2016; Dabrowska, 2016). Поэтому исследование уровня загрязнения донных отложений является объективной и надежной оценкой экологического состояния оз. Гусино.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В представленной работе исследованы образцы донных отложений оз. Гусино и пробы илов и донных отложений в устье рек, впадающих в озеро. Отобраны образцы почвы и золы с территории ГРЭС, расположенной на водосборной площади р. Загустай. Расположения точек отбора показаны на рис. 1, их характеристики приведены в табл. 1.

Места отбора проб донных отложений для исследования форм нахождения основных элементов-загрязнителей были выбраны исходя из сложившейся ситуации антропогенного воздействия на озеро согласно требованиям межгосударственного стандарта (ГОСТ 17.1.5.01-80). Пробы донных отложений отбирались из поверхностного слоя осадков на наблюдательных створах с глубины до 9.5 м дночерпателем Петерсона массой 10 кг и площадью захвата 0.025 м. В результате были отобраны пробы донных отложений, сформированные в условиях природно-техногенного воздействия. В качестве фонового уровня загрязне-

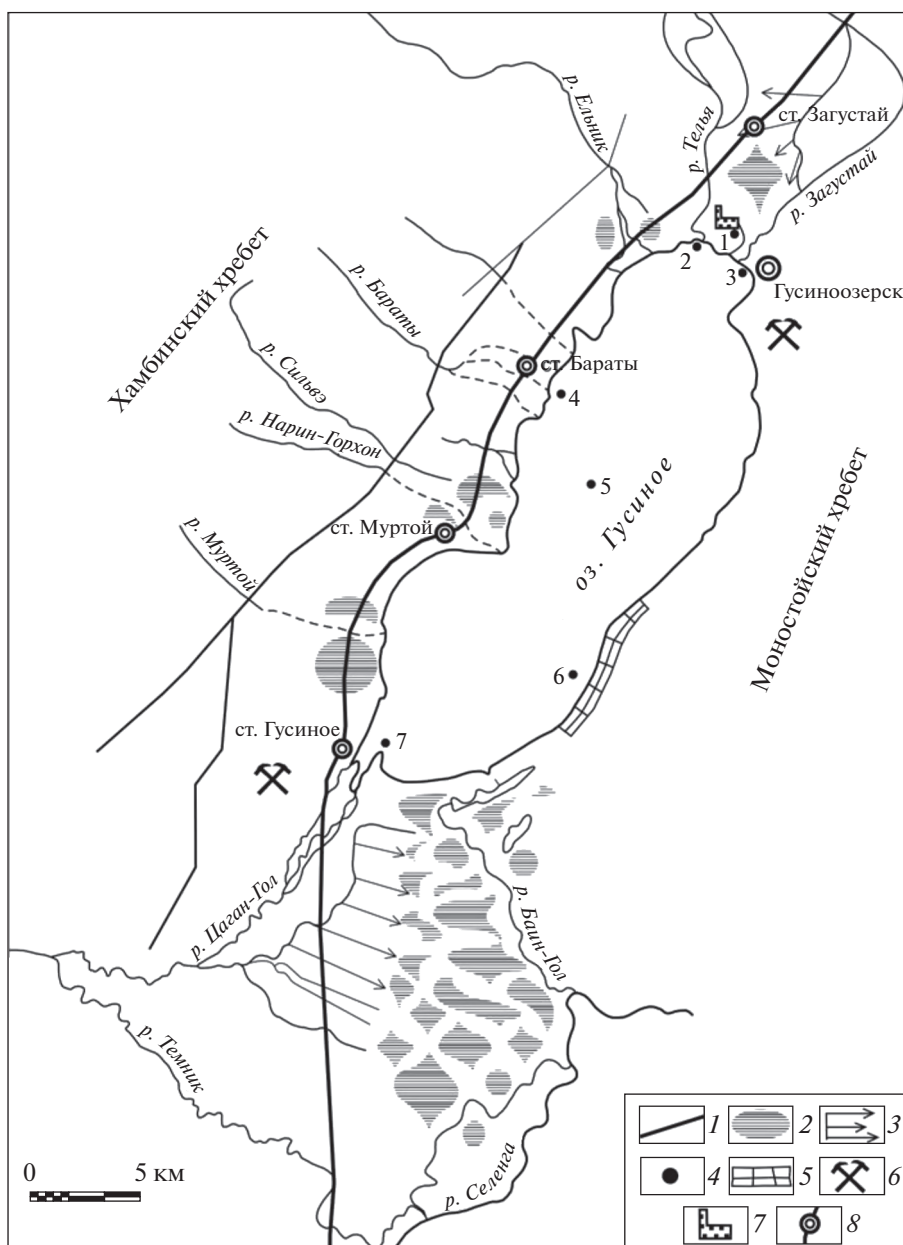


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб донных отложений, почвы и золы (описание точек в табл. 1). Условные обозначения: 1 — линия тектонического разлома; 2 — заболоченные земли; 3 — направление стока грунтовых вод; 4 — места отбора проб; 5 — территория размещения отвалов вскрышных пород Холбожджинского разреза; 6 — угольные шахты; 7 — территория занятая объектами инфраструктуры ГРЭС; 8 — железнодорожные станции.

ния донных отложений приняты фоновые значения озер Сибирского региона (Страховенко, 2011). Отбор проб золы и почв проводился методом конверта со сторонами 20 м до глубины 10 см.

Для оценки качества донных отложений помимо определения валового состава наиболее часто используют статические и динамические методы фракционирования форм элементов (Федотов, Спиваков, 2008). Данные методы позволяют определить формы нахождения элементов, свя-

занные с конкретными фазами донных отложений, путем их извлечения из пробы различными реагентами. Впервые статический метод последовательного химического экстрагирования морских донных отложений был предложен Гольдбергом и Херстом (Goldberg, Arrhenius, 1958; Hirst, Nicholls, 1958). Определение формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях и вероятность их миграции в водный слой можно выполнить с помощью модифицированного ме-

Таблица 1. Характеристика исследованных проб

№ пробы	Описание образца проб и места их отбора
1-1	Почва на территории ГРЭС
1-2	Зола шлакоотвала ГРЭС
2	Донные отложения устья р. Телья, воздействие стоков промплощадки ГРЭС, ремонтной базы
3	Донные отложения устья р. Загустай, воздействие стоков ЖКХ г. Гусиноозерск
4	Донные отложения устья р. Бараты, воздействие стоков с ж/д станция
5	Донные отложения в центральной части озера Гусиное
6	Донные отложения озера в месте водного стока отвалов вскрышных пород Холбольджинского угольного разреза
7	Донные отложения устья р. Цаган-Гол, воздействие стоков ж/д станции, шахты, артиллерийских складов

тода фракционирования BCR (Community Bureau of Reference) (Whalley, Grant, 1994). В настоящее время этот метод является стандартом для фракционирования соединений тяжелых металлов в донных отложениях и почве в Европе. Так, в работе (Santos et al., 2010) использован метод последовательной экстракции для исследования распределения металлов Al, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb и Zn в донных отложениях реки Гвадиамар (Испания), подвергшейся загрязнению сельскохозяйственными и промышленными отходами. В настоящее время она является единственным методом, по которому проведена аттестация стандартных образцов почв, илов и донных отложений.

Определение подвижных форм тяжелых металлов произведено по модифицированной схеме BCR, согласно которой для последовательного выделения фракций использованы следующие растворы: 0.11 М CH_3COOH , 0.5 М $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ (pH 1.5), 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (pH 2). Для приготовления растворов использовали реагенты квалификации чда и осч. Данный метод позволяет выделить следующие формы нахождения тяжелых металлов: 1 — ионообменная водо- и кислоторастворимая (в эту фракцию концентрируются металлы, адсорбированные на поверхности глинистых частиц и легко переходящие в раствор при изменении pH, а также карбонатные формы), 2 — оксидов железа и марганца (эти поглотители металлов нестабильны при дефиците кислорода), 3 — органических веществ и сульфидов (освобождение растворимых металлов из этой фракции возможно в окислительных условиях), 4 — остаточная фракция.

Элементы определяли на масс-спектрометре с индуктивной связанной плазмой высокого разрешения Element XR Thermo scientific Fisher (“ЦКП “Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований” ГИН СО РАН”, г. Улан-Удэ) с использованием стандартного многоэлементного раствора металлов для атомно-эмиссионной спектроскопии (Merck). Наряду с пробами был проанализирован стандартный об-

разец донных отложений BCR—701 в трех повторностях с каждой партией проб. Полученные результаты удовлетворительно согласуются со стандартными показателями.

Для донных отложений отсутствуют ПДК загрязняющих веществ и их подвижных форм. Оценку загрязненности водоемов необходимо проводить сравнением массовой доли каждого загрязняющего элемента с фоновыми значениями. Из загрязняющих элементов приоритетными для наблюдений являются медь, цинк, свинец, хром (РД, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое содержание элементов в донных отложениях изученных объектов представлено в таблице 2. Анализ приведенных данных показывает, что содержание свинца и хрома во всех пробах незначительно варьирует. Химический состав донных отложений оз. Гусиное (№ 5), р. Телья (№ 2) р. Бараты (№ 4) имеют близкие значения по содержанию элементов и не превышают показатели фона по Cr, Ni и Zn. Содержание меди в р. Бараты выше фоновых значений в 1.7 раза. Количество свинца в донных отложениях створ рек Бараты и Телья и озера Гусиного значительно ниже фоновых значений.

Высокое содержание Cr (в 1.9 раза), Cu (в 5.7 раза), Pb (в 1.4 раза), Zn (в 5 раз), Mn (в 1.6 раза), Fe (в 2.5 раза) по сравнению с фоновыми значениями наблюдается в донных отложениях на участке поступления водного стока с Холбольджинского угольного разреза (№ 6). Известно, что угольная промышленность входит в перечень источников загрязнения такими химическими элементами как Fe, Cd, Ni, Pb, Zn, Cu, Mn, Be, Co, Sr, ПАУ, их азот- и серосодержащими гетероциклическими производными, нефтепродуктами (РД, 2013).

Большой вклад в загрязнение озера Гусиного вносят реки Загустай и Цаган-Гол. Донные отложения, отобранные в устье р. Загустай содержат огромные количества загрязняющих веществ

Таблица 2. Общее содержание элементов (мг/кг) в анализируемых образцах ($n = 3$; $P = 0.95$)

№ пробы	Содержание элементов, мг/кг						
	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn	Mn	Fe
1-1	14.8 ± 0.7	44.2 ± 2.1	11.6 ± 0.9	2.62 ± 0.3	31.5 ± 2.5	481 ± 18	9458 ± 258
1-2	63.0 ± 3.4	45.4 ± 2.1	43.4 ± 2.2	5.80 ± 0.4	124 ± 5.1	685 ± 19	35120 ± 689
2	49.2 ± 2.3	19.6 ± 1.4	13.6 ± 0.8	3.41 ± 0.3	67.0 ± 4.7	927 ± 22	35260 ± 753
3	91.4 ± 4.8	261 ± 7.3	231 ± 6.7	39.8 ± 1.9	555 ± 8.9	894 ± 23	38020 ± 764
4	16.2 ± 0.8	21.2 ± 1.5	37.2 ± 1.8	1.60 ± 0.1	41.0 ± 4.2	336 ± 15	6284 ± 186
5	43.6 ± 2.1	30.0 ± 1.8	25.4 ± 1.2	4.00 ± 0.3	74,2 ± 3.9	434 ± 16	30140 ± 562
6	103 ± 5.1	68.8 ± 3.2	125 ± 4.3	14.4 ± 0.8	328 ± 6.4	715 ± 21	42940 ± 846
7	87.4 ± 4.6	444 ± 8.9	263 ± 6.8	36.4 ± 1.7	598 ± 8.7	957 ± 24	44380 ± 837
Фон*	53	28	22	20	66	443	17000

* По данным Страховенко, 2011.

Таблица 3. Среднее содержание подвижных форм тяжелых металлов (мг/кг) в донных отложениях рек Цаган-Гол и Загустай ($n = 3$; $P = 0.95$)

Фракция	Реки	№ пробы	Элементы, мг/кг				
			Zn	Cu	Pb	Ni	Cr
Обменная	Цаган-Гол	7	94.7 ± 4.9	17.0 ± 1.1	1.23 ± 0.1	4.20 ± 0.5	0.90 ± 0.1
	Загустай	3	101 ± 4.3	17.4 ± 1.3	0.94 ± 0.1	3.70 ± 0.4	0.70 ± 0.1
Восстанавливаемая	Цаган-Гол	7	116 ± 5.2	80.0 ± 3.6	14.1 ± 0.7	7.30 ± 0.5	3.70 ± 0.2
	Загустай	3	127 ± 6.1	91.0 ± 3.4	15.7 ± 0.8	6.80 ± 0.4	3.70 ± 0.2
Окисляемая	Цаган-Гол	7	97.5 ± 4.5	66.8 ± 2.7	6.28 ± 0.3	8.00 ± 0.5	5.20 ± 0.3
	Загустай	3	171 ± 6.7	59.7 ± 2.6	9.61 ± 0.5	5.20 ± 0.4	5.50 ± 0.3

вследствие поступления сточных вод жилищно-коммунального хозяйства г. Гусиноозерск и аэротехногенного загрязнения территории водосбора атмосферными выбросами ГРЭС. Почва (№ 1–1) и зола (№ 1–2), отобранные на территории ГРЭС различаются между собой по химическому составу. В почве наблюдается накопление никеля. В золе установлены повышенные относительно фона содержания никеля, меди, цинка, марганца, железа в 1.6; 2.0; 1.9; 1.5; 2.1 раза соответственно. Известно, что концентрация элементов в золашлаковых выбросах в несколько раз выше, чем в исходном угле. При сжигании углей в атмосферу поступает в среднем: не менее 10% общей массы содержащихся в них Al, Co, Fe, Mn, Na, Se; 30% Cr, Cu, Ni, V; 50% Ag, Cd, Pb, Zn; 100% As, Br, Cl, Hg, Sb и Sc (Крылов, 2010).

Вызывают опасения высокие содержания загрязняющих веществ в донных отложениях в месте впадения реки Цаган-Гол, которая является самой крупной водной артерией (85% притока) впадающей в оз. Гусиное. Река Цаган-Гол имеет протяженность 25 км и является левым рукавом р. Темник. Сравнение валовых содержаний элементов в донных отложениях озера в месте впаде-

ния р. Цаган-Гол с фоновыми значениями свидетельствует о наличии источников загрязнения в водосборе р. Цаган-Гол (табл. 2). Содержание Cr и Pb в донных отложениях устья р. Цаган-Гол превышает фон в 1.6 и 1.8 раза соответственно. По Ni превышение достигает в 15.9 раза, по Cu в 11.9 раз, по Zn в 9.1 раза (табл. 2). Источниками Zn, Cu и Ni вероятно служат железнодорожная станция Гусиное озеро, шахта, а также осколки артиллерийских снарядов, рассеянных по рассматриваемой территории в результате взрыва складов боеприпасов на станции Гусиное озеро в начале 2000-х гг. (Тулохонов и др., 2012). Гильзы артиллерийских снарядов изготавливаются из латуни – сплава меди (68%) с цинком (32%). Остатки снарядов, попавших на дно озера, вероятно, подвергаются коррозионным процессам, что влечет за собой накопление тяжелых металлов в донных отложениях озера в этом месте.

Сравнение донных отложений по содержанию подвижных форм тяжелых металлов выявило, что пробы, взятые в устье р. Цаган-Гол и р. Загустай, значительно отличаются от валовых фоновых значений высокими содержаниями меди и цинка (табл. 3). Суммарное содержание наиболее по-

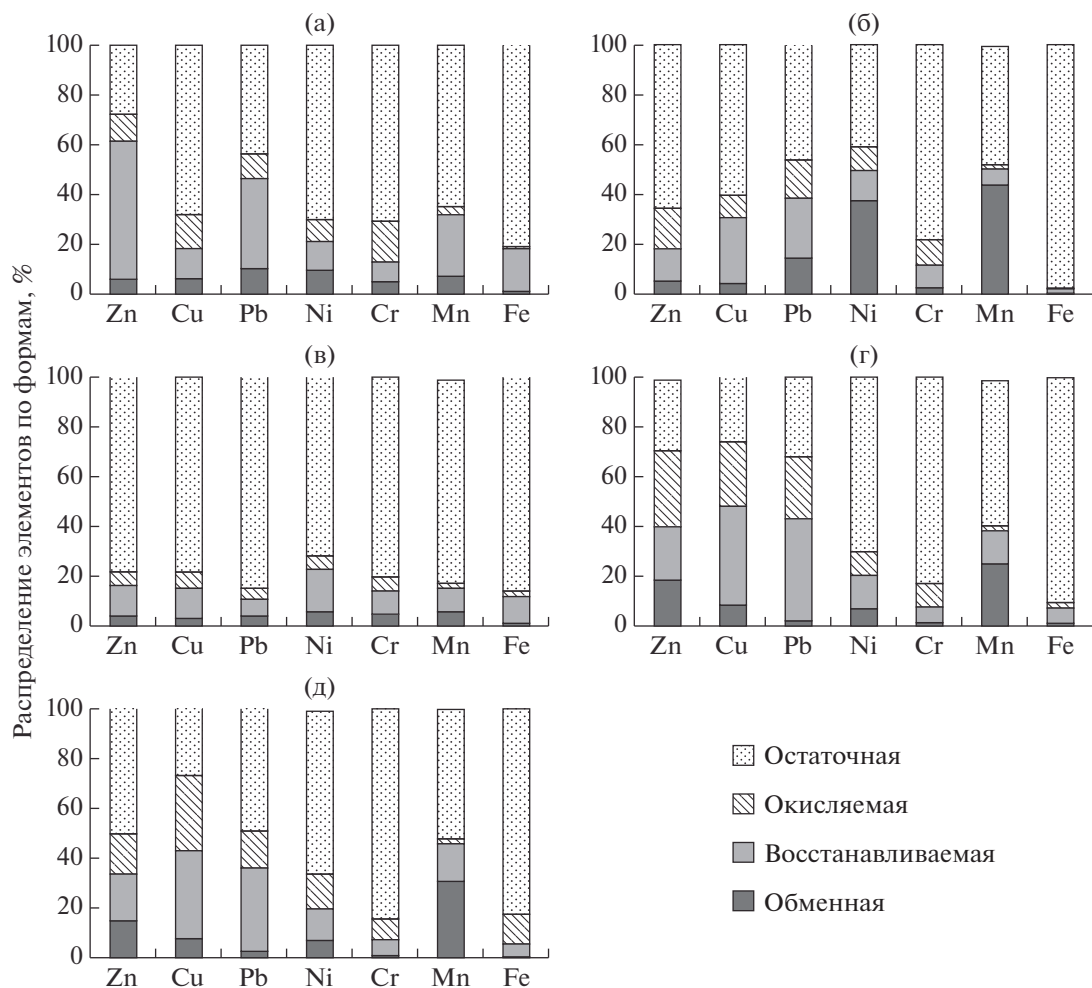


Рис. 2. Диаграммы распределения форм элементов в донных отложениях: а – оз. Гусиное (т. 5), б – р. Телья (т. 2), в – угольный разрез (т. 6), г – р. Загустай (т. 3), д – р. Цаган-Гол (т. 7).

движных форм элементов обменной и восстанавливаемой фракций, представляющих опасность для окружающей среды, составляет по меди 97 (в 4.4 раза) мг/кг в образце донного отложения р. Цаган-Гол и 108.4 (в 4.9 раза) мг/кг в р. Загустай. Превышение фоновых значений по цинку в 3.2 раза (210.7 мг/кг) в р. Цаган-Гол и в 3.4 раза (228 мг/кг) в р. Загустай. Никель в изученных донных отложениях, как и хром, является малоподвижным, несмотря на его высокие валовые содержания в пробах.

Полученные данные по фракционированию форм тяжелых металлов в образцах представлены на диаграммах (рис. 2). Известно, что обменные и восстанавливаемые формы тяжелых металлов являются наиболее подвижными и биологически доступными элементами (Курилов и др., 2009). Результаты фракционирования элементов выявили большую долю вышеназванных форм в исследуемых объектах.

Наиболее подвижная обменная фракция во всех пробах по всем изученным элементам нахо-

дится в пределах от 1 до 38% от общего содержания. Наибольшей подвижностью обладают Zn (4–18%) и Pb (2–15%). Вклад Cu и Cr в обменной фракции во всех образцах не превышает 8%. Донные отложения, взятые в створе р. Телья, заметно отличаются от других проб. Так, количество обменного Ni достигает 38% от общего содержания (рис. 2 – диаграмма б). Высокие содержания подвижных форм никеля, свидетельствуют о том, что объект исследования до настоящего времени находится под постоянным и долговременным воздействием источника загрязнения этим металлом.

Восстанавливаемая форма тяжелых металлов в образцах преобладает над окисляемой формой. Не исключено, что произошло частичное растворение гуматов и фульватов при извлечении восстанавливаемой формы, что завышает результаты по восстанавливаемой форме и занижает по окисляемой форме (Савонина и др., 2006). Подвижность в данном случае обусловлена высвобождением элементов связанных с оксидами марганца и железа при восстановительных процессах в во-

доемах (процессы застоя, гниения, разложения и прочее). Исследуемые образцы характеризуются высокими валовыми содержаниями марганца и железа, концентрация которых достигает 0.96 и 44 мг/г соответственно (табл. 2). Установленный ряд подвижности элементов для двух наиболее сильных источников загрязнения (р. Загустай и р. Цаган-Гол, рис. 2 — диаграммы г и д) озера одинаков и имеет следующий вид: Zn (16–22%) → Cu (35–40%) → Pb (33–41%). В донных отложениях оз. Гусино содержание восстанавливаемых форм Zn достигают 56% (рис. 2 — диаграмма а). При изменении окислительно-восстановительного потенциала донных отложений произойдет высвобождение элементов за счет растворения оксидов марганца и железа, которые присутствуют в исследованных объектах в огромном количестве. Высвободившиеся элементы перейдут в подвижную форму, и будут представлять потенциальную опасность для окружающей среды. Так по данным (Раднаева, 2018) реакция среды озера Гусино в поверхностном слое составляет в среднем рН 8.2, в придонном слое рН 8.1. При этом окислительно-восстановительный потенциал выше в придонном слое воды, что влияет на содержание тяжелых металлов в донных отложениях.

Для всех образцов характерно в основном преобладание остаточной формы Ni (65–73%), Cr (71–84%), Mn (52–82%), Fe (82–97%) над подвижными. Эти формы элементов являются труднодоступными и не представляют угрозы экологическому состоянию озера Гусино. В р. Загустай содержание труднодоступных форм Cu, Zn, Pb всего 27–32% от общего количества. В пробах р. Цаган-Гол количество остаточной формы меди 28%, по Pb и Zn 50–51%. Полученные результаты свидетельствуют о наличии загрязненности р. Загустай и Цаган-гол медью, цинком и свинцом.

Диаграмма форм нахождения элементов для образца донных отложений связанного с воздействием стока с угольного разреза заметно отличается от диаграмм, построенных для других участков. Здесь количество остаточной формы по всем элементам преобладает над подвижными формами (рис. 2 — диаграмма в). Такой вид диаграммы свидетельствует о прекращении активного воздействия угольного разреза на формирование донных отложений. При этом наблюдается высокое содержание относительно прочно связанных тяжелых металлов с матрицей образца при одновременно низком содержании обменной фракции элементов. Действительно, угольный разрез был закрыт 19 лет назад, количество шахтных вод сбрасываемых в озеро снизилось. В настоящее время наблюдаются только сезонные стоки с отвалов вскрышных пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что донные отложения озера Гусино загрязняются сбросами сточных вод с промышленных предприятий и с населенных пунктов. В наибольшей степени происходит загрязнение цинком, медью, никелем и железом.

Проведенные исследования выявили, что для Ni, Cr, Mn, Fe общим свойством является их нахождение в донных отложениях в труднодоступной форме. Представляет угрозу для экологического состояния озера высокое содержание биологически доступных форм Cu, Zn, Pb в р. Загустай и Цаган-Гол. Результаты фракционирования форм тяжелых металлов образца донных отложений вблизи угольного разреза выявило, что содержание элементов в подвижной форме меньше, чем в остаточной фракции. Наблюдается высокое содержание прочно связанных с матрицей тяжелых металлов, которые не представляют экологической опасности для окружающей среды.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту № АААА-А21-121011890033-1 “Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока”; работа проведена с использованием средств Центра коллективного пользования “Аналитического центра минералогических, геохимических и изотопных исследований” при ГИН СО РАН (Улан-Удэ, Россия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко И.М., Пронин Н.М., Шайбонов Б.Б. (1994) *Экология озера Гусино*. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 199 с.
- Гигиенические нормативы (2003) *Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования*. М: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения Российской Федерации, 74 с.
- ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. 5 с.
- Гуржапов Б.О., Цыдыпов Б.З., Андреев С.Г. и др. (2017) Оценка влияния сбросов Гусиноозерской ГРЭС на термический и гидрохимический режим оз. Гусино. *Экология водоемов — охладителей энергетических станций: Сборник материалов Всерос. науч.-практ. конф. с межд. уч.* Чита, 57–65.
- Крылов Д.А. (2010) Тяжелые металлы в летучей золе ТЭС. *Энергия: экономика, техника, экология*. (4), 44–50.
- Курилов П.И., Круглякова Р.П., Савицкая Н.И., Федотов П.С. (2009) Фракционирование и определение форм тяжелых металлов в донных отложениях Азовского моря. *Журнал аналитической химии*. **64**(7), 757–765.
- Павлов И.А., Тулохонов А.К., Ширеторова В.Г., Раднаева Л.Д. (2017) Микроэлементный состав вод озера Гусино. *Экология водоемов — охладителей энергетиче-*

ских станций: Сборник материалов Всерос. науч.-практ. конф. с межд. уч. Чита, 232-234.

Плюснин А.М., Чернявский М.К., Перязева Е.Г. (2015) Основные факторы загрязнения поверхностных и подземных вод в зоне влияния Холбольтжинского угольного разреза (Республика Бурятия). *Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы Всерос. совещания по подземным водам Востока России* Якутск, 229-235.

Раднаева Л. Д., Ширеторова В.Г., Цыбекмитова Г.Ц., Павлов И.А., Андреев С.Г., Пинтаева Е.Ц., Гармаев Е.Ж., Тулохонов А.К. (2018) Особенности макро-и микро-элементного состава и пигментных характеристик планктонных водорослей оз. Гусиное в подледный период. *Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика.* (4), 13-25.

РД 52.24.609–2013 (2013) Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов. Росгидромет ФГБУ “ГХИ”, 27 с.

Решетняк О.С., Закруткин В.Е. (2016) Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента). *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки.* 4, 102-109.

Савонина Е.Ю., Федотов П.С., Веннрих Р. (2006) Пятистадийное динамическое фракционирование форм меди, цинка и свинца в почвах, илах и донных отложениях с применением вращающихся спиральных колонок. *Журнал аналитической химии.* 61(7), 759-766.

Страховенко В.Д. (2011) Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири. Автореф. ... доктора геол.-мин. наук. Новосибирск: Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 33 с.

Тулохонов А.К., Гармаев Е.Ж., Андреев С.Г. (2012) Опыт социально-экологической реабилитации последствий взрывов боеприпасов (на примере катастрофы на станции Гусиное озеро, Республика Бурятия). *Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: Сборник материалов XVII междунауч. науч.-практ. конф.* М., 154-160.

Федотов П.С., Спиваков Б.Я. (2008) Статические и динамические методы фракционирования форм элементов в почвах, илах и донных отложениях. *Успехи химии.* 77(7), 690-703.

Хажеева З.И., Плюснин А.М. (2018) Современное состояние воды озера Гусиное (Западное Забайкалье). *Водные ресурсы.* 45(1), 68-74.

Цыдыпов Б.З., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А. и др. (2017) Влияние сбросов Гусиноозерской ГРЭС на термический и гидрохимический режим озера Гусиное. *Известия Иркутского государственного университета.* 22, 135-150.

Ширеторова В.Г., Павлов И.А., Раднаева Л.Д., Тулохонов А.К. (2017) Гидрохимическая характеристика озера Гусиное. *Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Труды VI Всерос. симп. с межд. уч.* Барнаул, 286-288.

Dabrowska L. (2016) Chemical forms of heavy metals in bottom sediments of the mitrega reservoir. *Civil Environ. Eng. Rep.* 21(2), 15-26

Goldberg E., Arrhenius G. (1958) Chemistry of Pacific pelagic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 13, 153-212.

Hirst D., Nicholls G. (1958) Techniques in sedimentary geochemistry. 1. Separation of the detrital and nondetrital fractions of limestones. *J. Sediment. Petrol.* 28, 468-481.

Pisarsky B.I., Hardina A.M., Naganawa H. (2005) Ecosystem evolution of lake Gusinoe (Transbaikal region, Russia). *Limnology.* 6(3), 173-182.

Santos A., Santos J.L., Aparicio I, Alonso E. (2010) Fractionation and Distribution of Metals in Guadiamar River Sediments (SW Spain). *Water Air Soil Pollut.* 207(1-4), 103-113.

Whalley C., Grant. A. (1994) Assessment of the phase selectivity of the European Community Bureau of Reference (BCR) sequential extraction procedure for metals in sediment. *Anal. Chim. Acta.* 61, 2211-2221.