СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ российской академии наук

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

Геология и геофизика, 2017, т. 58, № 12, с. 1944—1954

ГИДРОГЕОХИМИЯ И ЭКОГЕОХИМИЯ

УДК 550.837 + 550.4.02 + 550.424.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ГОРНО-РУДНЫХ ОТХОДОВ ГЕОХИМИЧЕСКИМИ И ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ (на примере хвостохранилища Салаирского горно-обогатительного комбината) М.И. Эпов^{1,2}, Н.В. Юркевич^{1,2,3}, С.Б. Бортникова¹, Ю.Г. Карин¹, О.П. Саева¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20/1, Россия

Проведены комплексные исследования хранилища сульфидсодержащих отходов Салаирского горно-обогатительного комбината (СГОК) Дюков Лог. Данные геохимического опробования вещества, дополненные результатами частотного зондирования и электротомографии, позволили выявить зональность среды и установить зависимости геоэлектрических параметров среды от химического состава вещества отходов и минерализации поровых растворов. Предложенный подход позволит в будущем оценить объем накопленных хвостов. В настоящее время определены направления миграции дренажных потоков и доказано проникновение высокоминерализованных техногенных растворов в горизонт грунтовых вод.

Сульфидные отходы горно-рудного производства, электротомография, частотное зондирование, геоэлектрический разрез, удельное электрическое сопротивление.

ANALYSIS OF MINE WASTE BY GEOCHEMICAL AND GEOPHYSICAL METHODS (a case study of the mine tailing dump of the Salair ore-processing plant)

M.I. Epov, N.V. Yurkevich, S.B. Bortnikova, Yu.G. Karin, and O.P. Saeva

Integrated study of the Dyukov Log dump of sulfide-containing mine tailings of the Salair ore-processing plant (SOP) was performed using geochemical and geophysical methods. Geochemical data and results of electromagnetic-frequency sounding and electrical-resistivity tomography were used to establish the geoelectric zoning of the tailings and the relations between the electrical parameters of the environment and the chemical composition of the tailings and pore waters. The proposed approach will make it possible in the future to evaluate the amount of tailings. The drainage water flow paths were determined, and the penetration of highly saline industrial solutions into groundwaters was proved.

Sulfide-containing mine tailings, electrical-resistivity tomography, electromagnetic-frequency sounding, geoelectric section, resistivity

введение

Актуальность исследования сульфидных отходов обусловлена экологическими рисками: формированием кислого дренажа, распространяющего токсичные элементы на десятки километров от хранилищ; просачиванием поровых высокоминерализованных растворов в грунтовые воды; загрязнением почв и атмосферного воздуха за счет эолового сноса тонкоизмельченного материала хвостов [Мур, Рамамурти, 1987; Salomons, 1995; Бортникова и др., 2003, 2006; Lottermoser, 2007; Nordstrom, 2015]. Интерес к теме сульфидных отходов продиктован еще и перспективами извлечения из них ценных компонентов. Высокие концентрации Cu, Zn, Ag, Au, зачастую превышающие кондиции современных руд, позволяют рассматривать хвостохранилища в качестве «техногенных месторождений» [Птицын, 2014].

Одним из перспективных подходов к изучению состава хвостохранилищ и путей миграции дренажных растворов является применение геофизических методов. Электроразведка позволяет оптимизи-

© М.И. Эпов, Н.В. Юркевич[⊠], С.Б. Бортникова, Ю.Г. Карин, О.П. Саева, 2017

[™]e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

DOI: 10.15372/GiG20171207

ровать систему мониторинга техногенных систем, сократив число отбираемых проб для геохимических исследований, оценить ресурсы полезных компонентов и оконтурить зоны распространения подземных дренажных потоков [Burton, Ball, 2010; Bortnikova et al., 2011, 2013; Nearing et al., 2013; Yurkevich et al., 2015, 2017; Оленченко и др., 2016].

Применение электроразведки для изучения состава техногенных систем впервые описано в единичных работах зарубежных исследователей [Oldenburg, 1999; Campbell et al., 1999; Buselli, Lu, 2001]. На сегодняшний день достаточно подробно освещено построение геоэлектрических разрезов и их интерпретация на качественном уровне с выделением электропроводящих зон, приуроченных к участкам с высокоминерализованными поровыми растворами. Пока нет методики четкого разграничения окисленных и неокисленных зон, водонасыщенных сульфидных хвостов и подстилающих грунтов [Oldenburg, 1999; Burton, Ball, 2010; Nearing et al., 2013]. При анализе геоэлектрических разрезов можно достоверно выделить лишь высокопроводящие зоны, которые обусловлены минерализацией поровых растворов. Природа электропроводности сульфидных отходов до конца неясна: малоизучен вклад вторичных сульфатных минералов в общую электропроводность за исключением единичных зарубежных работ [Blowes, 1997; Horton, 2003], мало исследований по электропроводности сульфидных минералов в теле отходов [Nelson, Van Voorhis, 1983; Sheriff et al., 2009] с применением современных методов. А между тем при изучении техногенных систем геофизическими методами (частотное электромагнитное зондирование, электротомография) четко выделяются зоны низкой электропроводности, содержащие при этом высокие концентрации сульфидных минералов (пирита, арсенопирита). При изменении условий внешней среды, например, при подъеме грунтовых вод, увеличении количества атмосферных осадков, эти объекты становятся источниками кислоты и металлов [Bortnikova et al., 2011, 2013; Yurkevich et al., 2015].

Для понимания механизмов миграции и осаждения химических элементов внутри тела отходов и их выноса за пределы техногенной системы необходима правильная интерпретации данных электроразведки. Она базируется на знаниях о природе электрической проводимости отходов (вкладах минерального скелета и порового раствора). Это позволяет на основе геофизических данных прогнозировать трансформации техногенной системы.

В работе приведены результаты исследований состава сульфидсодержащих отходов обогащения руд Салаирского рудного поля, складированных в хвостохранилище Дюков Лог, методами частотного зондирования и электротомографии с верификацией классическими геохимическими анализами. Задачей исследования является установление взаимосвязи между химическим составом вещества отходов на глубине до 2 м и удельным электрическим сопротивлением среды для того, чтобы показать приуроченность локальных участков с низкими УЭС на геоэлектрических разрезах к обводненным горизонтам, поровые воды которых представляют собой высокоминерализованные растворы.

Конечная цель исследований — разработка комплексной методики определения состава складированных отходов горно-рудного производства и выявление масштабов распространения высокоминерализованных вод.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка барит-полиметаллических месторождений Салаирского рудного поля в 1930—1980-х годах привела к образованию хранилищ отходов, до сих пор являющихся источниками поступления химических элементов (Zn, Pb, Cu, Cd, As, Sb, Co, Ni) в окружающую среду. Дюков Лог — хвостохранилище Салаирского горно-обогатительного комбината (СГОКа) образовалось в результате складирования отходов флотации и цианирования барит-полиметаллических рудных тел в 1942—1975 гг. Хвостохранилище расположено в естественном логу в черте г. Салаир (рис. 1).

Отложения, слагающие хвостохранилище, поступали из природной зоны окисления рудных тел и поэтому состоят из сильноизмененных пород и минералов [Бортникова и др., 2003]. Первичные рудные минералы представлены пиритом (3.5 %), галенитом и сфалеритом (по 0.5 %). Сульфиды в среднем окислены на 30 %. Среди вторичных рудных минералов преобладают гидроксиды железа (1 %), англезит и смитсонит (по 0.3 %). Главные жильные минералы — кварц, барит и каолинит. За время существования хранилища в нем накоплено около 1.5 млн т отходов. На сегодняшний день размеры хвостохранилища — 400×300 м, на его поверхности находятся небольшие пруды, являющиеся реликтами гидроотвала, ниже дамбы по рельефу — пруд-отстойник, принимающий фильтрационные стоки с хранилища (см. рис. 1).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Геоэлектрические параметры. В ходе полевых работ 2013 г. оконтурены площадки 235×235 м на поверхности хвостохранилища. Геоэлектрические разрезы построены по трем профилям: двум параллельным, расположенным на расстоянии 50 м друг от друга, и перпендикулярному им (см. рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения профилей геофизического профилирования на хвостохранилище Дю-ков Лог.

1 — вещество отходов; *2* — шурфы; *3*, *4* — профили: *3* — электротомографии А, Б, В, *4* — частотного зондирования 1—6; *5* — озера на поверхности хвостохранилища.

Шаг измерений по профилю составлял 5 м при длине каждого профиля 235 м. Измерения проведены с использованием многоэлектродной электроразведочной станции «СКАЛА-48», разработанной в лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН. При измерениях применена последовательность подключения электродов, соответствующая установке Шлюмберже. Обработка данных проведена с применением программ Res2DInv и Res3DInv [Loke, 2009]. В 2013 г. полученные геоэлектрические данные дополнены результатами частотного зондирования при помощи электромагнитного сканера ЭМС (разработка ИНГГ СО РАН) по шести профилям длиной 45 м (см. рис. 1).

Петрофизические характеристики. Влажность, гранулометрический состав, пористость и плотность образцов отходов определялись в лаборатории экспериментальной сейсмологии ИНГГ СО РАН к.т.н. Н.А. Голиковым.

Физико-химические характеристики. Для геохимического опробования вертикальных разрезов выкопаны и опробованы 7 шурфов (глубиной до 3 м) в зонах с наименьшими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) среды. Физико-химические параметры вещества определены в полевых условиях в суспензиях, приготовленных в соотношении вода/порода = 1/2 (т.н. «пасты»). Этот метод хорошо известен в зарубежной литературе [Smart et al., 2002] и дает первичную информацию о составе жидкой фазы, формирующейся при контакте вещества отходов с атмосферной водой. В пастах измерены величины удельной электропроводности (УЭП) прямым кондуктометрическим методом прибором Cond315i (производство Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH). Прибор определяет электропроводность в диапазоне от 0.0 мкСм/см до 500 мСм/см с относительной погрешностью ± 0.5 %.

Значения pH и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) измерены прямым потенциометрическим методом при помощи портативного прибора Эксперт-001 («Эконикс-Эксперт», г. Москва). Перед измерением pH проведена калибровка прибора по стандартным растворам с известными значениями pH (3.56; 4.01; 6.86; 9.18). Точность измерений составляла ± 0.01 pH.

Химический состав вещества отходов и водных вытяжек. В лабораторных условиях определен элементный состав отобранных проб отходов методом РФА-СИ [Барышев и др., 1986] на станции ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН. Из параллельной навески извлечены водные вытяжки в соотношении вода/порода = 10/1. В них определены физико-химические параметры (pH, Eh, электропроводность) теми же приборами, которые использованы при полевых работах.

Содержание Cl⁻ в растворах определены прямым потенциометрическим методом при помощи портативного прибора Эксперт-001-3.0.4 («Эконикс-Эксперт») и ион-селективного электрода. Относительная погрешность в диапазоне концентраций 10—500 мг/л составляла 10 %. При концентрациях хлоридионов в растворе более 500 мг/л использовалось предварительное разбавление пробы дистиллированной водой. Концентрации сульфат-иона в растворах определены турбидиметрическим методом на спектрофотометре ПЭ-5400-ВИ («Экохим», г. Санкт-Петербург) с относительной погрешностью 10 %. Концентрации макрокатионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺) и микроэлементов определены методом атомно-эмиссионной спектрометрии (ИСП-АЭС) на приборе IRIS Advantage (Thermo Jarrell Ash, США) в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (аналитик С.Ф. Нечепуренко) с относительной погрешностью 5—10 %.

Значения УЭС в твердых образцах определены методом резистивиметрии на приборе Miller 400D (М.С. Miller Co., Inc., США) при различном водонасыщении с относительной точностью ± 1.6 %.

Минеральный состав образцов определен рентгеноструктурным методом на дифрактометре ДРОН-3 с монохроматизированным излучением в ИГМ СО РАН (аналитик к.г.-м.н. Н.А. Пальчик).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Состав вещества отходов. Материал отходов, складированных в хвостохранилище Дюков Лог, неоднороден, имеет серую, ярко-рыжую, бурую окраску и запах серной кислоты. Хвосты переслаиваются плотным влажным материалом с обломками среднего размера, что обусловлено пересыпанием отходов шламом в ходе заполнения хранилища, с одной стороны, и уплотнением тонкодисперсных хвостов переработки руды в процессе складирования, с другой. УЭС среды по данным частотного и вертикального электрического зондирований варьирует от 1 до 170 Ом м (рис. 2, *a*). В верхней части оконтуренной площадки до глубины 20 м расположено вещество с УЭС 1—50 Ом м.

Наиболее проводящие области находятся под прудами (см. рис. 2, a, пр. А и В). В середине площадки (на отметке 110 м пр. А и В) существует участок 40×40 м из насыпного шлама, со временем покрывшийся почвенным слоем и растительностью. Под этим участком до глубины 7 м расположены горизонты с УЭС от 150 до 350 Ом·м. Коренным породам естественного лога, в пределах которого расположено хвостохранилище, соответствуют горизонты с УЭС 800—12000 Ом·м (см. рис. 2, a, пр. А, Б справа). Фактическим изолятором является также дамба, ограничивающая хранилище с юго-запада (см. рис. 2, a, пр. В слева). По профилям частотного электромагнитного зондирования можно предварительно судить о существовании проводящих областей от поверхности до глубины 2 м на всю длину площадки и локальных проводящих зон мощностью 6 м на отметках 25—45 м.

По физико-химическим параметрам вещество отходов делится на два типа: окисленный материал с низкими значениями pH (2—4), высокими окислительно-восстановительными потенциалами (400—600 мВ) и нейтральные пробы (pH 7.0—7.7) со значениями Eh от 100 до 150 мВ. Наиболее низкие значения УЭС (2—9 Ом м) соответствуют окисленному веществу (табл. 1, шурф 2). Графики изменения значений pH и УЭС по глубине зеркальны относительно распределения Eh: горизонты с наименьшими



Рис. 2. Геоэлектрические разрезы хвостохранилища Дюков Лог по профилям электротомографии (*a*) и частотного электромагнитного зондирования (*б*).

значениями pH характеризуются высокими окислительно-восстановительными потенциалами и низкими УЭС (высокой проводимостью, рис. 3).

Визуальное чередование разного по цвету и крупности материала подтверждается сменой его физических характеристик, УЭС и химического состава (см. рис. 3, табл. 1).

Низкие значения УЭС среды характерны для тонкозернистых горизонтов (средний размер более 70 % частиц 0.6—0.8 мкм), содержащих 4—5 мас. % К и Аl и наиболее высокие суммарные концентрации металлов. В минеральном составе этих проб преобладают каолинит, аргиллит, к.п.ш., слюда. Здесь также повышено содержание сульфатной серы по сравнению с другими слоями (см. табл. 1), а влажность варьирует от 10 до 50 % и не коррелирует с распределением УЭС. В течение долгих лет склади-

				I			· •	1 / 1 -					
	Проба	УЭС	pН	Eh	W	K _n	ρ	d	К	Fe	Al	S _{sulfate}	Σ _{Me}
Шурф 2	ДЛ-2.1	6	2.9	450	10	36	2.0	0.80	3.5	6.6	3.7	0.71	11
	ДЛ-2.2	9	3.7	380	9	39	2.2	3.4	1.2	3.5	1.2	0.61	6
	ДЛ-2.3	3	2.6	480	34	53	1.8	0.85	2.5	2.5	3.2	1.03	7
	ДЛ-2.4	8	2.9	480	11	39	1.8	2.4	0.8	3.2	1.0	0.53	5
	ДЛ-2.5	2	2.6	500	39	54	1.7	0.65	3.5	2.4	4.0	1.07	8
Шурф 3	ДЛ-3.1	19	7.3	150	20	54	1.7	1.2	1.7	2.6	1.8	0.24	6
	ДЛ-3.2	27	7.7	130	20	47	1.9	1.6	1.2	3.0	1.7	0.31	6
	ДЛ-3.3	22	7.6	130	34	56	1.9	1.1	2.3	2.2	2.9	0.37	7
	ДЛ-3.4	56	7.6	110	10	42	2.0	3.8	0.6	2.9	1.0	0.24	5
	ДЛ-3.5	22	7.3	110	36	54	1.9	1.1	2.8	2.6	3.4	0.29	8
	ДЛ-3.6	27	7.7	100	16	43	1.8	1.1	1.0	3.0	1.4	0.27	6
	ДЛ-3.7	7	7.2	120	46	54	1.5	0.55	4.1	2.2	5.0	0.49	9

Таблица 1. Физико-химические, физические характеристики и содержания некоторых элементов в пробах отходов хвостохранилища Дюков Лог

Примечание. УЭС в Ом·м, Ећ в мВ, влажность W в %, коэффициент пористости K_n в %, плотность ρ в г/см³, d — средний размер частиц, мкм (> 70 % по количеству); содержания калия, железа, алюминия, сульфатной серы и \sum_{Me} — суммарное содержание металлов (Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb) в мас. %.

рования происходит, видимо, уплотнение хвостов, повышается их влажность, активно протекают процессы выветривания, в том числе окисления сульфидов с образованием сульфатных минералов. Пониженные значения УЭС данных горизонтов обусловлены тремя факторами: 1) ионной проводимостью вторичных сульфатных соединений металлов, образующихся при окислении сульфидов; 2) ионной проводимостью минерального скелета за счет образования сорбированных форм металлов, концентрирующихся на глинистом сорбционном барьере; 3) повышенной электропроводностью минерализованного порового раствора (суммарные концентрации металлов в вводных вытяжках имеют обратную корреляцию с УЭС среды, см. рис. 3). Выделяются и более сухие слои (влажность 9 %) среднезернистого материала с УЭС около 8 Ом⁻м (см. табл. 1, пр. ДЛ-2.2, ДЛ-3.7). Здесь понижение УЭС может быть обусловлено наличием первичных сульфидов.

Состав водных вытяжек. Разнородное по составу вещество отходов продуцирует соответственно две группы водных вытяжек: кислые (pH 2.0—4.3) и околонейтральные (pH 5.9—7.2) с минерализацией от 0.18 до 2.7 г/л. Как правило, значения Eh тем выше, чем ниже pH раствора, исключение составляет водная вытяжка, приготовленная из вещества с глубины 0.25 м, со значением pH 2.2 и относительно низким окислительно-восстановительным потенциалом 110 мВ (табл. 2, пр. ДЛ-3.4), что может быть обусловлено микробиологическими процессами. Примечательно, что значение pH пасты для этой пробы равно 7.6. Вероятнее всего, более длительное взаимодействие вещества отходов с водой при приготовлении вытяжки (24 ч) по сравнению с пастами (10 мин) обусловливает растворение вторичных сульфатных минералов с образованием кислоты, в результате значение pH вытяжки значительно снижается по сравнению с пастой.

В анионном составе кислых растворов преобладают сульфат- и хлорид-ионы, в околонейтральных пробах появляется гидрокарбонат-анион, и в пр. ДЛ-3.6 с pH = 7.2 содержание HCO_3^- (130 мг/л) выше, чем суммарная концентрация Cl⁻ (5.3 мг/л) и SO_4^{2-} (54 мг/л) анионов (см. табл. 2). Наибольшими значениями УЭП характеризуются пробы, приготовленные из вещества с относительно крупным размером частиц (3.4—3.8 мкм), они же имеют самую высокую минерализацию. Высокие концентрации Cu, Zn, Cd, Pb в водных вытяжках свидетельствуют о подвижности металлов при переходе в водный раствор за счет растворения вторичных минеральных форм. Подвижность металлов, как правило, увеличивается в кислых условиях, а мышьяка и сурьмы, наоборот, в нейтральных и субщелочных [Abrosimova et al., 2015]. Концентрации Cu, Zn, Cd в водных вытяжках увеличиваются с глубиной (см. табл. 2), т. е. их соединения мигрируют вниз вместе с кислым дренажным раствором. Исключение составляет свинец, который в кислых сульфатных условиях за счет формирования малорастворимого англезита (PbSO₄) концентрируется в верхних горизонтах (см. табл. 2, шурф 2).

Мышьяк и сурьма в условиях кислого дренажа оказываются менее подвижными и также остаются на верхних горизонтах. Исключение составляет водная вытяжка из пр. ДЛ-2.5 (см. табл. 2) на глубине 60 см, в которой концентрация мышьяка достигает 30 мкг/л и максимальна для данного разреза. Окислительные условия (Eh = 500 мB) способствуют формированию пятивалентных форм мышьяка — ани-



Рис. 3. Изменение УЭС среды и состава вещества отходов с глубиной:

I — УЭС, Ом·м; *2* — окислительно-восстановительного потенциала Eh, B; *3* — pH; *4* — коэффициента проницаемости K_n, %; 5 — средний размер частиц (>70 % по количеству), мкм; *6* — суммарное содержание металлов (Fe, Al, Cu, Zn, Cd, Pb) в твердом, %; 7 — суммарные концентрации этих же элементов в растворе, мг/л; *8* — тонкодисперсные слои.

онов мышьяковой кислоты $H_2AsO_4^-$. Напротив, в шурфе 3 при значениях pH = 2.2—3.6 и Eh от 110 до 130 мВ (пр. ДЛ-3.3 и ДЛ-3.4) мышьяк в растворе находится в наиболее токсичной трехвалентной форме в виде соединений $HAsO_{2aq}$ и $As(OH)_3$ согласно анализу Eh—pH диаграмм для форм мышьяка в растворе [Smedley, Kinniburg, 2002; Takeno, 2005]. Это означает, что на глубине всего 10—25 см в хвостохранилище Дюков Лог созданы восстановительные условия среды (вероятно, за счет жизнедеятельности микроорганизмов), сформировано мышьяковое «депо», являющееся источником As^{3+} до 98 мкг/л, способного переходить в раствор при контакте с дождевой водой.

Результаты эксперимента. Эксперимент с измерением УЭС в отходах методом резистивиметрии при различном водонасыщении вещества показал, что УЭС падает с ростом влажности образца (рис. 4). При соотношении вода/порода = 1/2 (консистенция пасты) УЭП тонкозернистых слоев ниже



УЭП сульфидных песков. Последнее, по-видимому, связано с большим вкладом в УЭП минерализованного порового раствора, образующегося при контакте вторично измененного (окисленного) вещества с водой. Но близкие значения УЭС тонкозернистых слоев и сульфидных песков не дают пока возмож-

Рис. 4. Изменение УЭС глинистых образцов (*a*) и сульфидных песков (*б*) из хвостохранилища Дюков Лог в ходе эксперимента в зависимости от соотношения вода/порода.

1/	ДЛ-2.1	ДЛ-2.2	ДЛ-2.3	ДЛ-2.4	ДЛ-2.5	ДЛ-3.1	ДЛ-3.2	ДЛ-3.3	ДЛ-3.4	ДЛ-3.5	ДЛ-3.6	ДЛ-3.7	
компонент			Шурф 2			Шурф 3							
Глубина, см	30	38	45	55	60	2	5	10	25	30	40	80	
pН	4.3	3.0	4.1	6.8	5.9	6.8	6.7	3.6	2.2	6.9	7.2	7.0	
Eh, мВ	445	380	480	476	500	150	130	130	110	115	100	116	
УЭП, мкСм/см	730	1700	850	136	60	110	820	650	2300	110	160	160	
SO ₄ ²⁻ , мг/л	380	1100	410	50	10	42	400	310	1200	10	54	56	
Cl [_]	63	1400	150	3.6	11	8.9	12	12	1300	3.6	5.3	7.1	
HCO_3^-	9.2		9.2	120	76	43	92	140	н.о.	92	130	85	
Na	2.3	1.8	1.7	2.1	1.6	1.8	2.4	6.2	6.7	6.5	6.7	6.3	
Mg	33	19	53	20	71	3.8	3.5	8.1	4.2	7.5	5.8	27	
Ca	150	180	260	210	420	72	48	93	68	77	63	270	
Al	2.8	11	33	2.1	49	0.75	1.3	1.5	1.2	1.4	0.92	0.62	
Fe	1.5	4.6	28	16	43	0.90	2.0	2.3	3.4	0.9	0.64	0.11	
Cu	0.44	0.84	2.9	0.43	4.6	0.17	0.28	1	0.43	0.14	0.53	0.10	
Zn	30	31	140	17	210	0.76	1.4	2.0	1.4	0.5	1.2	0.74	
Pb	0.021	0.64	0.035	0.012	0.018	0.74	2.8	2.4	0.79	1.0	0.31	0.073	
As	0.011	0.028	0.010	0.010	0.030	0.035	0.063	0.098	0.0075	0.010	0.010	0.010	
Cd	0.077	0.066	0.29	0.027	0.45	0.001	0.0024	0.0016	0.0010	0.0032	0.001	0.010	
Sb	0.0013	0.0025	0.0063	0.0010	0.0063	0.013	0.014	0.010	0.0025	0.010	0.005	0.007	
Минерализация, г/л	0.67	2.7	1.1	0.44	0.89	0.18	0.57	0.59	2.5	0.21	0.27	0.46	

Таблица 2. Состав водных вытяжек, приготовленных из вещества отходов хвостохранилища Дюков Лог

ности в полевых условиях однозначно интерпретировать их чередование в многослойной структуре техногенной системы.

Связь геофизических данных и геохимического состава. Существует обратная корреляция между УЭС паст и суммарной концентрацией металлов в веществе отходов, что отражено в распределении этих параметров по глубине шурфа (см. рис. 3). Кроме того, значения УЭС паст обратно коррелируют с содержанием сульфатной серы в твердом веществе (рис. 5 (I)) и суммарными концентрациями металлов (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cd, Pb, см. рис. 5 (2)) и цинка в водных вытяжках (см. рис. 5 (3)). Это свидетельствует о приуроченности зон с низкими значениями УЭС к горизонтам интенсивного окисления сульфидного вещества с образованием вторичных сульфатных минералов. Данные рентгеноструктурного анализа подтверждают образование ярозитов, гипса, англезита, водные вытяжки содержат высокие концентрации сульфат-анионов (1-2 г/л), основные формы нахождения металлов — сульфатные комплексы по расчетным данным в ПК WATEQ4F [Ball, Nordstrom, 1991].



Рис. 5. Связь УЭС, содержания сульфатной серы в твердом веществе (1), суммарных концентраций металлов (2) и цинка (3) в водных вытяжках отходов хвостохранилища.



Рис. 6. Сопоставление расчетной ($C_{\text{расч}}$) и измеренной ($C_{\text{изм}}$) минерализаций водных вытяжек.

Сделав предположение, что электропроводность отходов Дюкова Лога обусловлена только минерализацией порового раствора (флюида) при непроводящем минеральном скелете, используем соотношение (1) для расчета минерализации флюида при заданном УЭС для изотропной гомогенной среды при постоянном давлении, мощности и проницаемости коллектора [Yao, Holditch, 1996; Li, Shen, 2003]:

$$\rho_w = \left[\left(0.1123 + \frac{3647.5}{C^{0.955}} \right) \frac{82}{1.8T + 39} \right],\tag{1}$$

где *С* — минерализация флюида, мг/л, *T* — температура, °С, *ρ* — УЭС среды, Ом·м, 0.1123 и 3647.5 — коэффициенты, полученные эмпирическим путем в результате экспериментального моделирования [Yao, Holditch, 1996].

Для расчетов были взяты значения УЭС, измеренные методом резистивиметрии на приборе Miller 400D в пастах. Расчетную теоретическую минерализацию порового раствора при известном УЭС сравнили с измеренной химическими методами минерализацией водной вытяжки. Измеренная минерализация водных вытяжек (по данным химических анализов) оказалась почти в 3 раза выше расчетной величины (рис. 6, коэффициент в уравнении равен 2.8), что свидетельствует о существенном вкладе в УЭП исследуемых отходов минерального скелета. Поскольку его величина не учтена в соотношении (1), то получаются существенно заниженные значения минерализации раствора. Поэтому для расчетов минерализации флюида в сложных гетерогенных хвостохранилищах необходимо использовать более сложные зависимости, например, для низкоомных коллекторов с учетом глинистости [Глинских и др., 2014; Мельник, Ерофеев, 2014].

Интерпретация полученных геофизических и геохимических данных. Результаты геохимического анализа вертикальных разрезов до глубины 2 м свидетельствуют о приуроченности зон низких УЭС на разрезах к обводненным горизонтам, поровые воды которых представляют собой высокоминерализованные растворы. Обводненные горизонты в приповерхностном пространстве по нарушенным



Рис. 7. Схематичный разрез хвостохранилища Дюков Лог.

Изменение концентраций цинка, меди и кадмия в поровых растворах (1), придонном слое (2) и поверхностной воде (3).

структурам поставляют растворы во вмещающие хранилища породы, иллюстрацией чему служит, например, профиль частотного электромагнитного зондирования № 4 (см. рис. 2, б). Далее растворы, достигая водоупора, стекают естественным образом в направлении склона борта долины, в которой расположено хвостохранилище.

Выщелачивание металлов по ходу фильтрации иллюстрируется гораздо более значительным возрастанием их концентраций в придонном слое воды по сравнению с поверхностным, еще выше содержание металлов в поровых растворах (от северного пруда к южному, рис. 7).

В поровых водах отстойника, расположенного за пределами хвостохранилища, на природных известняках, заметно снижаются концентрации Zn и Cd за счет осаждения твердых фаз при нейтрализации. В данном случае идет фильтрация растворов от северной части хвостохранилища в южную и далее — в отстойник, расположенный под дамбой для сбора дренажных растворов (см. рис. 7).

Однако, судя по данным электроразведки, в отстойнике нейтрализуется лишь небольшая часть стока из хвостохранилища, попадающая туда главным образом из поверхностного ручья. Основной подземный поток, минуя отстойник, несет суммарную нагрузку в виде выщелоченных из отходов металлов и затем в виде дренажа попадает в р. Малая Талмовая.

выводы

Были определены геоэлектрические свойства, химический состав и физические свойства вещества отходов в хвостохранилище Салаирского горно-обогатительного комбината Дюков Лог до глубины 3 м. Измерены величины УЭС на глубинах 0—40 м, построены корреляционные связи между УЭС и химическим (элементным) составом твердого вещества и растворов.

Результаты геохимического анализа вертикальных шурфов до глубины 2 м свидетельствуют о приуроченности зон низких УЭС на геоэлектрических разрезах к обводненным горизонтам, поровые воды которых представляют собой высокоминерализованные растворы.

Комплексное применение методов частотного электромагнитного зондирования, вертикального электрического зондирования, геохимического опробования и анализа вещества позволяют приближенно рассчитать изменение состава твердого вещества и водных вытяжек до глубины 7 м. Полученные результаты использованы для разработки методики, позволяющей, с одной стороны, подсчитать ресурсы ценных компонентов в хвостах и, с другой стороны, оценить экологическую опасность хранилища при подтоплении сезонными потоками и грунтовыми водами.

Авторы благодарят научных сотрудников ИНГГ СО РАН к.г.-м.н. А.В. Еделева, Н.А. Абросимову и Т.В. Корнееву за участие в пробоподготовке. Благодарим д.т.н. И.Н. Ельцова за участие в обсуждении результатов.

Работа была выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН IX.138.3.1 и при поддержке гранта фонда Президента РФ № МК-6654.2016.5 и РФФИ (грант 17-05-00056).

ЛИТЕРАТУРА

Барышев В.Б., Колмогоров Ю.П., Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. Рентгенофлюоресцентный элементный анализ с использованием синхротронного излучения // Журнал аналитической химии, 1986, т. 41, с. 389—401.

Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Айриянц А.А. Техногенные озера. Новосибирск, Академ. издво «Гео», 2003, 120 с.

Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2006, 169 с.

Глинских В.Н., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа с использованием петрофизических моделей электропроводности // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5—6), с. 1001—1010.

Манштейн А.К. Малоглубинная геофизика. Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 2002, 135 с.

Мельник И.А., Ерофеев Л.Я. Физико-геохимическая модель низкоомного коллектора и ее практическое применение // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2014, № 3, с. 46—50.

Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М., Мир, 1987, 288 с.

Оленченко В.В., Кучер Д.О., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Еделев А.В., Гора М.П. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (4), с. 782—795.

Птицын А.Б. Проблемы освоения техногенных месторождений Забайкалья // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2014, № 3, с. 128—130.

Abrosimova N., Gaskova O., Loshkareva A., Edelev A., and Bortnikova S. Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu–Mo deposit // J. Geochem. Explor., 2015, v. 157, p. 1-14, doi: 10.1016/j.gexplo.2015.05.009.

Ball J., Nordstrom D. User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic database and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters // U.S. Geol. Surv., Open file report, 1991, N 91—183.

Blowes D.W. The environmental effects of mine wastes / Ed. A.G. Gubins // Proceedings of Exploration 97. 4th Decennial International conference on mineral exploration. Toronto. Ont. Geo-F/X. Palo Alto. Calif. 1997, p. 997—892.

Bortnikova S., Manstein Y., Saeva O., Yurkevich N., Gaskova O., Bessonova E., Romanov R., Ermolaeva N., Chernuhin V., Reutsky A. Acid mine drainage migration of Belovo zinc plant (South Siberia, Russia): multidisciplinary study // Water Security in the Mediterranean Region. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, 2011, p. 191–208.

Bortnikova S., Yurkevich N., Bessonova E., Karin Y., Saeva O. The combination of geoelectrical measurements and hydro-geochemical studies for the evaluation of groundwater pollution in mining tailings areas. The handbook of environmental chemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, p. 239–256, doi: 10.1007/698_2013_234. 2013.

Burton B.L., Ball L.B. Geophysical investigation of Red Devil mine using direct-current resistivity and electromagnetic induction. Red Devil, Alaska, August 2010 // US Geol. Surv., 2011, p. 2011—1035.

Buselli G., Lu K. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods // J. Appl. Geophys., 2001, v. 48, p. 11–23.

Campbell D.L., Horton R.J., Bisdorf R.J., Fey D.L., Powers M.H., Fitterman D.L. Some geophysical methods for tailings/mine waste rock // Tailings and mine waste. Proc. Sixth Int. Conf. Tailings and Mine Waste, Fort Collins, CO, January 24–27, 1999, Rotterdam, A.A. Balkema, 1999, p. 35–43.

Horton R.J. Electrical property measurements of mine waste from the Sunday #2 and Venir mines. Leadville, Colorado, US Geological Survey, Open-file Report 03-149, 2003, 29 p.

Li S., Shen L.C. Dynamic invasion profiles and time-lapse electrical log [Электронный ресурс] // SP-WLA 44th Annual Logging Symposium, 2003, p. 1—13. Режим доступа: http://www.spwla.org/cgi-bin/shop. pl?choice=display;item id=2603.

Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies // A practical guide to 2-D and 3-D Surveys. London, N.Y., CRS Press, Boca Raton, 2009.

Lottermoser B.G. Mine wastes. Characterization, treatment, environmental impacts. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 2007.

Nearing G. S., Tuller. M., Jones. S. B., Heinse R. & Meding. M. S. Electromagnetic induction for mapping textural contrasts of mine tailing deposits // J. Appl. Geophys., 2013, v. 89, p. 11–20.

Nelson P.H., Van Voorhis G.D. Estimation of sulfide content from induced polarization data // Geophysics, 1983, v. 48, p. 62—75.

Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites // Appl. Geochem., 2015, v. 57, p. 17—34.

Oldenburg D.W., Li Y. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys // Geophysics, 1999, v. 64, № 2, p. 403—416.

Salomons W. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention // J. Geochem. Explor. 1995, v. 52, p. 5–23.

Sherriff B.L., Ferguson I.J., Gupton M.W., VanGulck J.F., Sidenko N., Priscu C., Gómez-Treviño E. A geophysical and geotechnical study to determine the hydrological regime of the Central Manitoba gold mine tailings deposit // Canad. Geotech. J., 2009, v. 46, № 1, p. 69—80.

Smart R., Skinner W.M., Levay G., Gerson A.R., Thomas J.E., Sobieraj H., Stewart W.A. ARD test handbook: Project P387. A prediction and kinetic control of acid mine drainage. AMIRA, International Ltd. Ian Wark Research Institute, Melbourne, Australia, 2002,

Smedley P.L., Kinniburgh D.G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters // Appl. Geochem., 2002, v. 17, № 5, p. 517—568.

Takeno N. Atlas of Eh-pH diagrams // Geol. Surv. Japan, Open file report, 2005, v. 419, p. 102.

Yao C.Y., Holditch S.A. Reservoir permeability estimation from time-lapse log data // SPE Formation Evaluation, 1996, v. 11, p. 69—74.

Yurkevich N.V., Saeva O.P., Karin Y.G. Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow, Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia // Toxicol. Environ. Chem., 2015, v. 97, № 1, p. 1—14.

Yurkevich N.V. Abrosimova N.A., Bortnikova S.B., Karin Y.G., Saeva O.P. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area // Toxicol. Environ. Chem., 2017, p. 1–18, doi: 10.1080/02772248.2017.1371308.

Рекомендована к печати 30 марта 2017 г. Н.В. Соболевым