ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(4):69-85
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 502.3/.7:504: 622.17: 631.41 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_69

ОКИСЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ КИСЛЫМИ СТОКАМИ СУЛЬФИДНЫХ ОТВАЛОВ (НА ПРИМЕРЕ КАРАБАШСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ)

М.В. Шабанов[1], М.С. Маричев[1], Т.М. Минкина[2], А.А. Соколов[3]

[1] Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Пушкин, Россия, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru
[2] Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Россия
[3] Филиал Южного федерального университета в Геленджике, Геленджик, Россия

Аннотация: Залежи техногенно-минеральных образований на территории Карабашской агломерации являются источником загрязнения окружающей среды. Они ежегодно подвергаются воздействию атмосферных осадков и контактируют с кислыми подотвальными водами. Отобранные образцы техногенно-минеральных образований исследовались методами рентгеновской дифракции и растровой электронной микроскопии. В морфологическом отношении шлаки преимущественно черные, стекловидные, различных размеров – от нескольких мм до десятков см. По минералогическому составу для шлаков характерны 8 основных типов минералов: кварц, фаялит, шпинелеподобные фазы, вюртцит, виллемит, халькопирит, халькозин и гринокит. В ходе работ установлено, что при контакте шлакоотвала с кислыми подотвальными водами сульфидного террикона происходит полное разрушение кристаллической структуры шлака и, как следствие, выщелачивание тяжелых металлов в окружающую среду. Толща окисленного шлака представлена такими минералами, как мусковит, кварц, клинохлор, гипс, пирит и лизардит, из тяжелых металлов преобладает Fe, S, Cu, Zn, As, Pb. По данным исследования установлено, что шлаки не остаются инертными к окружающей среде. Внутри отвала протекают реакции окисления кристаллической структуры шлака, в результате чего из кристаллической решетки высвобождаются тяжелые металлы, которые способны мигрировать в сопредельные ландшафты. Результаты данной работы могут способствовать пересмотру методов и способов хранения техногенных минеральных образований. Полученные в ходе работы данные по содержанию тяжелых металлов и минералогическому составу дают представление об использовании складируемых шлаков в качестве сырья для вторичной переработки.

Ключевые слова: шлак, тяжелые металлы, техногенно-минеральные образования, объекты накопленного вреда, подвижные формы, сульфидные отвалы, терриконы, техногенез.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-77-20089) в Южном федеральном университете

Для цитирования: *Шабанов М. В., Маричев М. С., Минкина Т. М., Соколов А. А.* Окисление техногенных минеральных образований кислыми стоками сульфидных отвалов (на примере Карабашской агломерации) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 69–85. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_69.

© М.В. Шабанов, М.С. Маричев, Т.М. Минкина, А.А. Соколов. 2024.

Oxidation of man-made mineral formations with acid waste water at sulphide-containing waste dumps: A case-study of Karabash agglomeration

M.V. Shabanov[1], M.S. Marichev[1], T.M. Minkina[2], A.A. Sokolov[3]

[1] Saint-Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Russia, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru
[2] Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
[3] Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia

Abstract: Man-made mineral formations in the area of Karabash agglomeration are the source of environmental pollution. They undergo the effects of rainfall all year round, and are in contact with acid waste water. The test samples of man-made mineral formations were analyzed using X-ray diffraction and electron scan microscopy. Morphologically, slags are generally black and glassy, and have different sizes—from a few millimeters to dozens centimeters. Mineralogically, slags feature 8 basic types of minerals: quartz, fayalite, spinel-like phases, wurtzite, willemite, chalcopyrite, chalcosine and greenockite. The testing shows that when a sulphide-containing slagheap gets in contact with acid underspoil water, the crystal structure of slag fails completely and heavy metals get leached into the environment. The oxidized slag layer contains such minerals as muscovite, quartz, clinochlore, gypsum, pyrite and lizardite, including dominant heavy metals of Fe, S, Cu, Zn, As and Pb. The tests prove that slag is not inert relative to the environment. Reactions of oxidation of crystalline slag run inside the slagheap, and heavy metals are liberated from the crystal lattice and can migrate to the adjacent terrain. The research findings can promote revising the methods and means of storage of man-made mineral formations. The test data on the content of heavy metals and on the mineral composition of waste suggest usability of slag as a recycling feedstock.

Key words: slag, heavy metals, man-made mineral formations, accumulated damage objects, mobile species, sulphide-containing waste dumps, slagheaps, technogenesis.

Acknowledgements: The study was carried out at the Southern Federal University and was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 21-77-20089.

For citation: Shabanov M. V., Marichev M. S., Minkina T. M., Sokolov A. A. Oxidation of man-made mineral formations with acid waste water at sulphide-containing waste dumps: A case-study of Karabash agglomeration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(4):69-85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_69.

Введение

Основная масса техногенных минеральных образований (ТМО) формируется в районах с развитой горноперерабатывающей и добывающей промышленностью. Одним из таких районов является город Карабаш Челябинской области, где сформировалось огромное количество твердых отходов. В результате добычи медно-колчеданной руды в данной местности сформированы два типа ТМО, первый образован при разработке шахт и представляет собой отвалы пустой породы, второй — шлак — сопутствующий продукт переработки медьсодержащей руды. Складирование данных образований привело к значительному ухудшению состояния окружающей среды в этом районе [1, 2]. Общее количество медных шлаков составляет 20 млн т. Шлаковые отвалы создают экологические проблемы, связанные с отчуждением земельных отводов, запыленностью, процессами естественного

выщелачивания [3 — 5]. Ежегодно мировая промышленность извлекает из недр Земли около 10 млрд т твердых веществ, 70% которых впоследствии становятся отходами при производстве промышленной продукции [6, 7].

Шлаки при складировании представляют собой огромные массивы, занимают значительные площади и являются полидисперсными, гетерогенными, открытыми системами [8]. Они относятся к твердым отходам IV и V класса опасности, образующимся в результате пирометаллургического производства меди [9]. Отходы нередко содержат токсичные элементы, в частности, тяжелые металлы (Cu, Zn, Pb) и металлоиды (As, Sb), которые могут попадать в окружающую среду в результате процессов [10, 11].

Горноперерабатывающие предприятия медной промышленности Урала накопили около 110 млн т шлаков, в которых содержится 410 тыс. т меди, 2,56 млн т. цинка, 1,09 млн т серы и 30,8 млн т железа [12]. Отвалы, как правило, заброшены, и подвергаются процессам выветривания. Наличие в шлаках системы пор облегчает миграцию дождевой воды, ускоряя выветривание и мобилизацию некоторых элементов. Потоки воды имеют существенное значение, так как они являются агентами выветривания и переносчиками тяжелых металлов за пределы шлакоотвала [13]. Однако металлургические шлаки традиционно считаются относительно инертными при большинстве атмосферных условий, так как многие токсичные элементы содержатся в малорастворимых силикатах, оксидах и стекле [14, 15]. При этом шлакоотвалы выступают в качестве динамически самоорганизующейся природно-техногенной системы, главным признаком которой является неконтролируемый рост разнообразия форм миграции химических элементов, обуславливающий стихийно развивающуюся временную изменчивость техногенных потоков рассеяния.

В данном исследовании рассматривается устойчивость техногенно-минеральных образований к воздействию

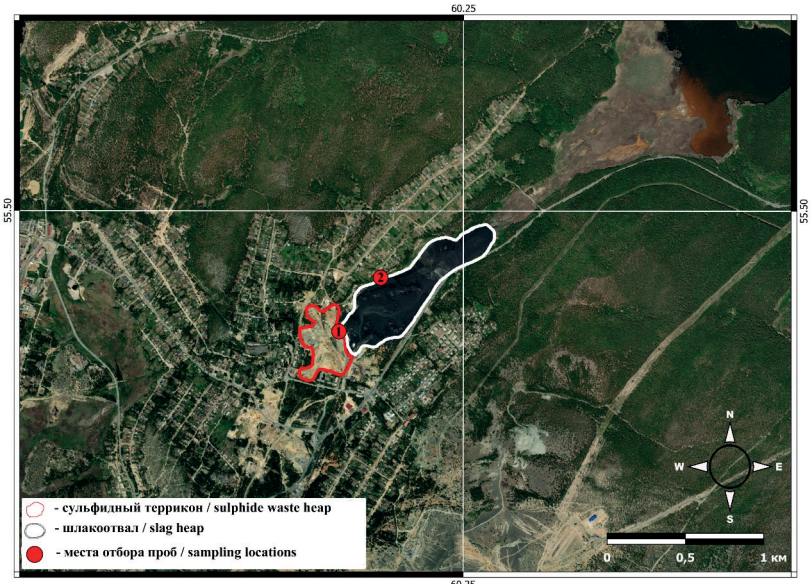

Рис. 1. Карта района исследования, место складирования техногенных минеральных образований
Fig. 1. Map of the study area, the place of storage of technogenic mineral formations

кислых подотвальных вод. К основным целям относится изучение химико-минералогических свойств шлака при взаимодействии его с подотвальными кислыми водами, определение основных мобильных элементов, выявление образующихся минералов.

Материалы и методы

Исследуемые техногенные минеральные образования складируются в северной части города Карабаш (Челябинская область) (рис. 1).

Наиболее массивный — шлакоотвал, вытянут в меридиональном направлении на 1285 м, максимальная ширина 250 м, максимальная высота 32 м. В геоморфологическом отношении расположен в понижении, с незначительным уклоном порядка 2—5°. Площадь земель, занимаемая отвалом, составляет 32 га. Второй объект ТМО — сульфидный террикон, представляет собой конусовидную насыпь высотой порядка 19 м, с крутизнохй склона 45°, прилегает к шлакоотвалу с юго-западной стороны и находится в тесной связи с ним.

В ходе работ были отобраны пробы ТМО со шлакоотвала и сульфидного террикона, с глубины 0,2 м, также был заложен шурф (рис. 1, точка № 2) глубиной 80 см, до подстилающей породы. Отбор проб проводился согласно ISO 18400-104.

Были проведены исследования отобранных проб ТМО и шурфа методом порошковой рентгеновской дифракции (Shimadzu XRD7000) и растровой электронной микроскопии, в результате получены микроснимки шлака, химический и минералогический состав.

Результаты и обсуждения

В ходе исследования шлакоотвала выявлено, что шлак представлен черными, иризирующими на раковистых сколах афировыми гранулами размером от 0,8 до 5 мм. Микроструктура шлака не отличается разнообразием: стекловатая матрица, в порах сульфидные обособления. По соотношению $CaO/(SiO_2)$ имеет низкоосновный состав, по степени кислотности (n = (кислотные оксиды,%)/(основные оксиды,%)) относится к основным. Поэтому данный вид шлака не остается инертным к воздействию кислых атмосферных осадков.

Проведенное исследование показало, что основной компонент пробы шлака (рентгеноаморфная фаза) представлен широким гало в области от 22 до 50° по шкале 2° (рис. 2).

В то же время, на дифрактограмме хорошо проявлены пики кварца (SiO_2) — d = 4,25; 3,34; 1,67 Å, фаялита $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$ — d = 5,23; 4,06; 3,55; 2,63; 2,56; 2,30 Å и др. Шпинелеподобные фазы с составом $(Cu,Fe,Zn)(Fe,Al)_2O_4$ проявлены слабыми рефлексами с d = = 2,53; 2,09; 1,64; 1,48 Å, как и анортит $Ca[Al_2Si_2O_8]$ с d = 3,23 и 3,76 Å. В качестве незначительных примесей отмечается наличие вюртцита (Zn,Cd)S, виллемита $ZnSiO_4$, халькопирита $CuFeS_2$, халькозина CuS и гринокита CdS.

Как показали исследования немецких ученых, фаялит является основной фазой в медном шлаке [16], в структуре фаялита атомы кремния координированы четырьмя атомами кислорода с образованием изолированных тетраэдров, в то время как остальные атомы металла окружены шестью атомами кислорода, что позволяет атомам других металлов замещать железо в структуре с образованием вюртцита. Вюртцит — неустойчивое соединение, в кислой среде гидролизуется до катиона цинка и аниона кремниевой кислоты [17]. В результате замещения цинка на железо или в результате его выщелачивания из структуры образуется двухвалентное железо, которое медленно окисляется. Окислившись до трехвалентного состояния и в

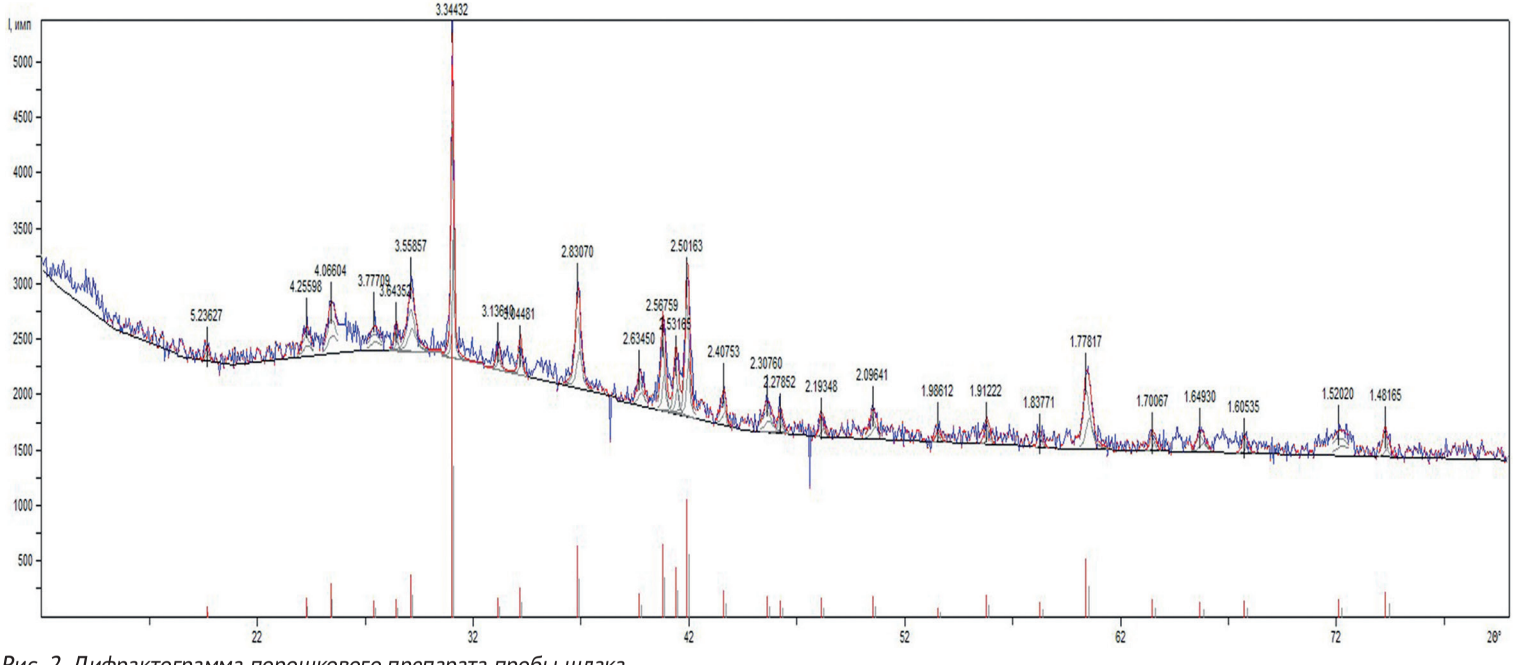

Рис. 2. Дифрактограмма порошкового препарата пробы шлака
Fig. 2. Diffractogram of powder preparation of slag sample

присутствии сульфидов трехвалентное железо может обеспечить окислительный механизм для других компонентов отвала.

Согласно проведенным исследованиям, силикаты кальция больше восприимчивы к кислотному воздействию, чем силикаты, содержащие магний [16]:

$$Ca\left[Al_2Si_2O_8\right] + 8H^+ = \\ = Ca^{2+} + 2Al^{3+} + 2SiO_2 + 4H_2O.$$

Анортит, входящий в кристаллическую структуру шлака, под действием кислотного гидролиза разрушается до гидратированного аморфного кремнезема, в то время как катион кальция в условиях сернокислой реакции среды образует гипс. Кристаллическая структура разрушается, и в раствор попадают тяжелые металлы [18].

Согласно полученным данным рентгеноструктурного анализа, основная масса шлака представлена силикатами с примесями сульфидов, что подтверждается данными электронно-микроскопического исследования (рис. 3, 4)

Электронно-микроскопическое исследование пробы металлургического шлака позволяет сделать заключение о том, что он является сложной полисоставной системой. Распределение в нем химических элементов неравномерно, и в определенной степени дискретно. В матрицу шлака в основном входят такие элементы как: кремний, алюминий, железо (табл. 1), кислород, кальций, и в меньшей степени калий, что отчетливо прослеживается по данным растровой-электронной микроскопии (рис. 4). В ходе исследования выявлено, что концентрация кремния от 31,76 до 63,51%, алюминия — от 5,13 до 6,98%, кальция — от 7,36 до 8,78%, железа — от 3,13 до 18,32% и калия — от 2,34 до 3,54%. Кроме этого, в основной структуре шлака присутствует магний — от 0,43 до 0,61%, титан — от 0,65 до 1,79% и барий — от 3,57 до 5,09%. Такие эле-

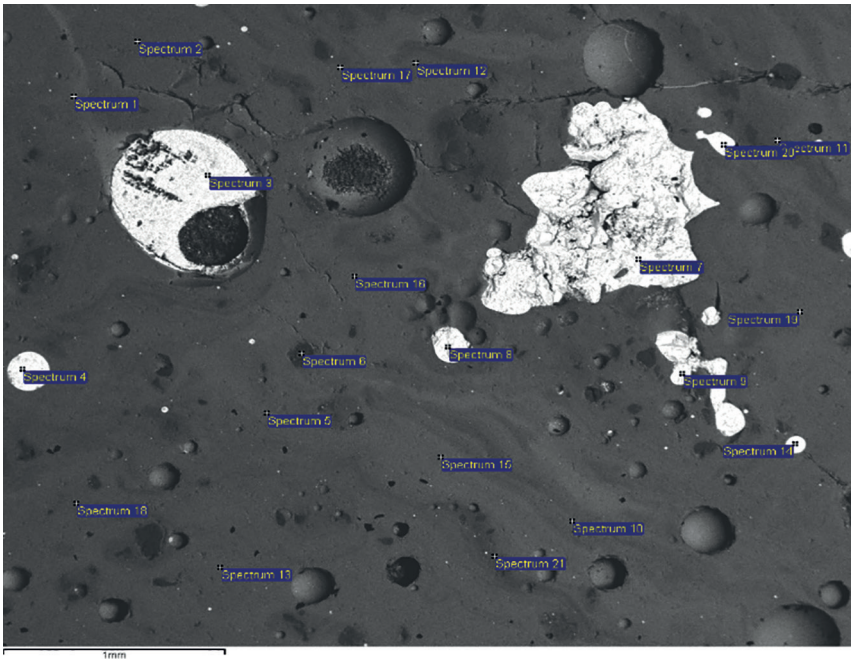

Рис. 3. Микрофотография препарата шлака с местами определения химического состава
Fig. 3. Microphotograph of a slag preparation with places where the chemical composition was measured

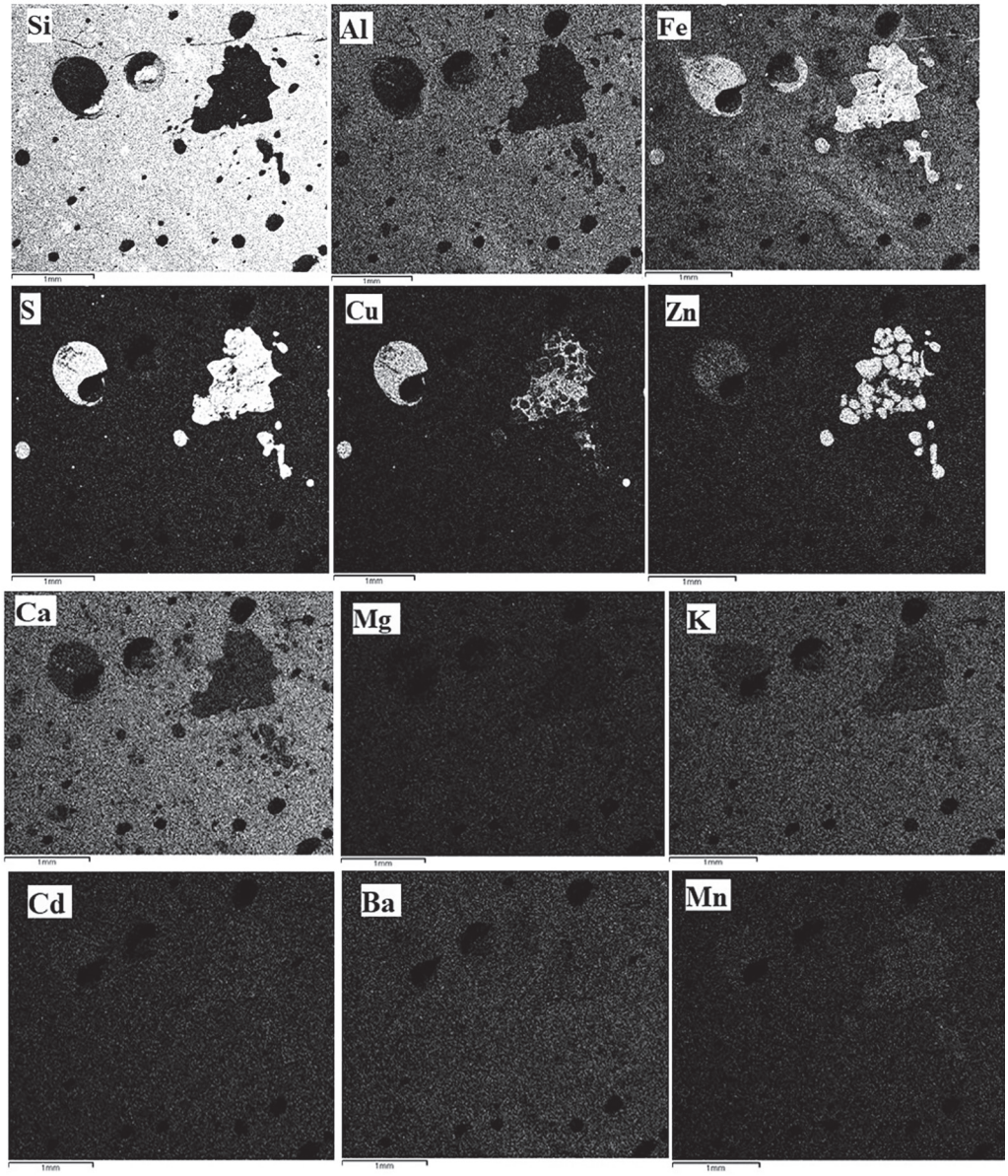

Рис. 4. Растровая электронная микроскопия шлака
Fig. 4. Scanning electron microscopy of smelting slag

менты, как кобальт, никель, медь, по данным анализа в основной кристаллической структуре не выявлены. Но выявлен цинк, его концентрация в силикатной структуре колеблется от 1,13 до 2,98% (табл. 1). Как видно из данных микроскопии, в составе шлака имеются каверные включения, которые состоят в основном из сульфидов. Концентрации элементов изменяются в широком диапазоне: серы — от 22,24 до 28,31%, железа — от 15,04 до 29,75%, меди — от 0,55 до 62,27%, цинка — от 5,24 до 52,14%, никеля — от 0,45 до 1,91%, ко-

Таблица 1

Результаты химического анализа в местах отбора проб
Results of chemical analyses at sampling locations

№ спектра	Элементы и их содержание, масс.%															
	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	Сумма
Spectrum 1	27,91	0,53	0,86	5,94	31,76		2,46	7,36	0,65	18,32					4,22	100,00
Spectrum 2	30,22	0,56	0,83	6,98	34,00		2,68	7,75	0,75	9,72				1,42	5,09	100,00
Spectrum 3						26,40				29,75			38,61	5,24		100,00
Spectrum 4						23,26				17,90			58,84			100,00
Spectrum 5	28,26	0,40	0,71	4,96	33,45		2,41	7,81	0,67	15,00				2,98	3,34	100,00
Spectrum 6	28,29				63,51	1,77				3,13				3,30		100,00
Spectrum 7	0,65					28,29				26,43		1,49	16,70	26,44		100,00
Spectrum 8	0,96					27,72				16,42	2,77		0,55	51,59		100,00
Spectrum 9						28,31				16,76		1,91	0,88	52,14		100,00
Spectrum 10	28,12	0,59	0,75	5,87	33,95		2,45	8,77	0,84	12,25				1,84	4,57	100,00
Spectrum 11	31,99	0,61	0,43	5,52	40,29		3,54	8,62	1,39	6,49				1,13		100,00
Spectrum 12	29,57	0,48	0,74	5,80	35,78		2,55	8,78	1,66	12,10				2,54		100,00
Spectrum 13	31,95	0,47	0,84	5,35	34,01		2,39	8,47	1,79	12,53				2,20		100,00
Spectrum 14						22,24				15,04	0,00	0,45	62,27			100,00
Spectrum 15	28,66	0,35	0,75	5,34	33,77		2,34	7,90	0,75	14,13				2,43	3,57	100,00
Spectrum 16	30,08	0,46	0,64	5,15	34,73		2,38	8,18	1,54	14,45				2,38		100,00
Spectrum 17	29,66	0,57	0,69	6,76	34,41		2,69	8,30	0,73	10,25				1,69	4,25	100,00
Spectrum 18	32,08	0,42	0,79	6,35	34,36		2,55	7,25	0,84	10,18				1,32	3,85	100,00
Spectrum 19	29,30	0,58	0,64	5,77	37,97		2,82	8,39	1,73	10,95				1,86		100,00
Spectrum 20					0,45	26,10				16,11	1,34		1,80	54,21		100,00
Spectrum 21	36,81	0,57	0,54	5,13	39,14		3,56	6,37	1,07	5,34				1,46		100,00

Таблица 2

Химический состав исследуемых компонентов, масс. %
Chemical composition of investigated components, wt. %

Элемент	Сульфидный террикон	Шлак	Слои шурфа, см	
			0—18	63—80
Fe	9,90	24,45	18,90	1,97
Si	13,43	8,31	11,56	1,56
Ca	1,10	4,07	0,71	29,98
Al	3,21	1,91	7,63	0,92
Zn	0,042	1,53	0,90	0,17
S	1,08	0,42	1,56	3,77
Ni	0,01	0,02	0,015	0,0054
Cu	—	0,058	1,26	0,15
As	0,072	0,025	0,052	—
Rb	0,0034	0,003	0,002	—
Sr	0,0072	0,009	0,0089	0,013
Na	0,18	0,03	0,44	0,088
Mg	1,03	0,32	0,96	0,80
P	0,12	0,06	0,07	0,016
K	1,59	0,176	1,33	0,029
Au	—	0,00005	—	—
Ti	0,34	0,35	0,11	0,029
Mn	—	0,108	0,07	0,041
Pb	0,001	0,0004	0,038	0,0066

бальта — от 1,34 до 2,77%, это позволяет предположить, что данные элементы находятся в виде сульфидов.

Дискретность распределения химических элементов, пространственная сложность их распределения в пробе шлака, разнообразие их нахождения в различных видах минералов влияют на скорость гидролиза отвальной массы, на неравномерность разрушения частиц, слагающих массив, и, как следствие, на степень и скорость выщелачивания из шлака тех или иных химических элементов.

Как было сказано выше, отвал шлака подвергается воздействию многих факторов, одним из которых является поступление продуктов окисления сульфидного отвала [19—21].

Морфологическое строение нижней части шлакоотвала представляет собой сильно заохренные слои, которые свидетельствуют о поочередном перекрывании осыпающейся части отвала и вновь поступающих порций сульфидов, в нижней части имеются слои, представленные карбонатами кальция, которые образовались в результате поступления карбонатного материала с бывшей станции нейтрализации, находящейся вблизи отвалов.

Важнейшей особенностью является химический состав отвалов. При формировании насыпи отвала в него попа-

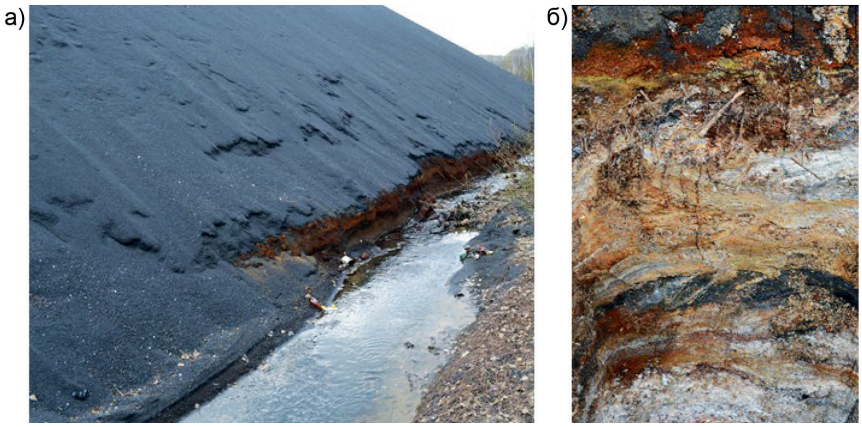

Рис. 5. Поверхностный сток, исходящий от сульфидного террикона (а); шурф, заложенный вблизи шлакоотвала (б)
Fig. 5. Surface runoff coming from the sulphide heap (a); pits laid in the vicinity of the slag dump (b)

дает некоторое количество добываемого сырья, что приводит к формированию своеобразных экотипов по химическому составу. В табл. 2 представлен химический состав сульфидного отвала.

В результате проведенного рентгеноструктурного анализа стало известно, что исследуемые слои погребенного шлака резко отличаются по химическому и минералогическому составу. По данным количественного анализа в сульфидной отвальной массе террикона из потенциально опасных химических соединений присутствуют: мышьяк — 0,072%, сера — 1,08%, цинк — 0,042% и железо — 9,90% (табл. 3).

Рентгенофазовый анализ пробы сульфидного террикона показал, что из твердых фаз отчетливо фиксируется кварц SiO_2 — 39,4%, клинохлор $[Mg, Fe]_6[Si, Al]_4O_{10}(OH)_8$, альбит $NaAlSi_3O_8$ — 4,34%, мусковит $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ — 13,4%, гипс $CaSO_4$ — 4,99%, ярозит $Fe_3(SO_4)_2(OH)_5{\cdot}2H_2O$ — 6,52%, пирит FeS_2 — 2%.

Кислые стоки сульфидного террикона стекают по градиенту рельефа в непосредственной близости от металлургического шлака (рис. 5), происходит их взаимодействие с отвальной массой, что еще больше способствует их гидролизу. На стыке взаимодействия формируется техногенный геохимический барьер.

Таблица 3

Данные рентгенфазового анализа слоя 0—18 см
X-ray phase analysis data of the 0—18 cm layer

Минерал	Формула	Концентрация, %
Мусковит	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	40,7
Кварц	SiO_2	31,4
Клинохлор	$[Mg, Fe]_6[Si, Al]_4O_{10}(OH)_8$	13,5
Тальк	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	9,39
Лизардит	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	2,61
Гипс	$CaSO_4{\cdot}2H_2O$	1,14
Пирит	FeS_2	1,07

Как показал рентгенофазовый анализ шурфа, слоя 0—18 см (табл. 3), в минералогическом составе первого слоя преобладают такие минералы, как: мусковит (40,7%) и кварц (31,4%). Эти же минералы в основном слагают сульфидный террикон, и перенесены в виде мелкодисперсного материала вместе с такими минералами, как тальк (9,5%) и клинохлор (13,5%). Кварц в определенной степени может быть и остаточным минералом — после окисления металлургического шлака.

Химический состав окисленного шлака существенно отличается от исходного. В окисленном преобладают такие элементы, как Fe, Si и Al, они составляют 38%, также в шлаке присутствуют K, Cu, Mg и Ca, на их долю приходится 4,26%.

Одной из ярких особенностей окисленного шлака, в отличие от исходного, является присутствие значительно более высоких концентраций Si, Al, K, Cu и Mg. Концентрация элементов, входящих в состав кристаллической структуры (Si, Al, K), выше в 1,4; 4 и 7,5 раз соответственно. Cu и Ca, которые унаследованы от исходной породы, в сравнении с неокисленным шлаком превышают концентрацию в 21 и в 5 раз соответственно. Концентрация Pb увеличилась с 0,0004 до 0,038%, As — с 0,025 до 0,052%, S — с 0,42 до 1,56%.

Содержание других элементов имеет тенденцию к уменьшению в окисленном шлаке в сравнении с исходным: для Zn — с 1,53 до 0,90%, для Mn — с 0,108 до 0,07% (см. табл. 2). В ходе окислительных процессов стекловидная фаза шлака разрушается, из кристаллических решеток минералов высвобождаются такие элементы, как Mn, Zn, а содержание Pb, As, S, Cu увеличивается.

Окисление нижней части шлакоотвала привело к образованию мощной зоны мелкозернистого охристого материала, сложенного привнесенными минералами, такими как мусковит, клинохлор, пирит. Гипс образовался в результате высвобождения ионов кальция из кристаллической структуры силикатов. Согласно данным рентгеноструктурного фазового анализа, окисленная фаза шлака не соответствует кристаллической структуре исходного шлака, что свидетельствует о полной деструктуризации кристаллической структуры шлака в зоне окисления.

Отсутствие фаялита и анортита в окисленных шлаках в слое 63—80 см (табл. 4) позволяют предположить, что данные кристаллические структуры полностью растворились в зоне окисления. Растворение силикатов и осаждение вторичных минералов, в основном сульфатов и карбонатов, приводит к увеличению pH среды. Вторичные фазы менее подвержены окислению на глубине, а выветривание может протекать более интенсивно, так как потоки кислых вод медленнее переносятся через слои отвала, и, следовательно, происходит более длительный контакт первичных и

Таблица 4

Данные рентгенфазового анализ шурфа, слоя 63—80 см
Data of X-ray phase analysis of pits, layer 63—80 cm

Минерал	Формула	Концентрация, %
Кальцит	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	78,2
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	12,2
Эттрингит	$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}(H_2O)_{26}$	8,79
Кварц	SiO_2	0,73

Таблица 5

Содержание подвижных и водорастворимых форм тяжелых металлов в шурфе по слоям
Content of mobile and water-soluble forms of heavy metals in the pits by layers

Слой	Мощность, см	pH	Водорастворимые, мг/кг				Подвижные, мг/кг			
			Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu
1	0 — 18	6,21	0,85	0,24	0,038	0,69	2660,0	2,8	3,85	2668,0
2	18 — 29	9,42	0,17	0,0061	0,11	0,18	5200,0	3,7	13,0	3987,0
3	29 — 41	9,60	0,043	0,0032	0,017	0,047	7200,0	5,1	18,5	1570,0
4	41 — 46	9,42	0,09	0,0055	0,063	0,064	755,0	0,37	11,5	770,0
5	46 — 63	10,34	0,081	0,0014	0,039	0,035	3027,5	3,3	2,7	2962,0
6	63 — 80	8,65	0,06	0,00056	0,0053	0,027	795,0	0,8	6,2	726,0
7	80 — 90	9,32	0,07	0,00082	0,014	0,072	2805,0	0,6	1,6	1505,0

вторичных фаз с реагирующими растворами.

Присутствие в окисленном шлаке минерала эттрингит является результатом реакции алюминия с растворенными веществами, такими как сульфат-анион, которые в данных условиях существуют в поровом растворе:

$$6Ca^{2+} + 2Al^{3+} + 3SO_4^{2-} + 32H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow Ca_2Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}(H_2O)_{26}.$$

Эттрингит образуется на глубине 80 см вследствие того, что щелочная среда способствует миграции алюминия. При pH > 10 эттрингит становится нестабильным и подвергается реакции карбонизации в присутствии воды, разлагаясь на гипс и кальцит:

$$Ca_2Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}(H_2O)_{26} + CO_3 \rightarrow$$
$$\rightarrow CaCO_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O +$$
$$+Al(OH)_3 + H_2O.$$

Происхождение кварца аутигенное, он образуется в виде кремнезема, который перемещается в поровом пространстве, выпадает в осадок и в течение времени превращается в кварц. Данный процесс образования кварца описан в исследованиях французских ученых [22].

В результате выветривания шлака высвобождаются тяжелые металлы, которые в окислительной обстановке становятся миграционно способными, но вследствие образования щелочного барьера они закрепляются в верхней части профиля шурфа. Данные табл. 5 показывают, что в слое 0 — 40 см концентрация подвижных и водорастворимых тяжелых металлов в значительной степени превышает концентрации в нижних слоях. Так как исследуемые слои шурфа имеют неоднородную структуру по гранулометрическому, минералогическому и химическому составу, то их окисление проходит неравномерно по всей толще и регулируется присутствием геохимических барьеров [23, 24].

Содержание тяжелых металлов в зоне окисления шлаков по сравнению с неокисленными представляет опасность для окружающей среды. Кроме этого, вследствие деструкции отвальной массы появляется мелкозернистый и мелкодисперсный материал, он легко может переноситься временными водными потоками, может быть опасен, так как становится биодоступным [25 — 27].

Данные химического анализа на водорастворимые и подвижные формы тяжелых металлов указывает, что исследуемые тяжелые металлы становятся менее миграционно способными в зоне окисления и щелочной среде. Тем не менее, данные металлы могут мигриро-

вать с водными потоками путем механического массопереноса коллоидных фракций вниз по профилю, и при смене окислительно-восстановительных условий вновь становятся мобильными.

Выводы

1. В результате исследования минералогического состава шлака выявлено, что он имеет кальциево-алюмосиликатно-фаялитово-вюрцитовый состав. Пустоты в шлаке заполнены сульфидами металлов, которые в сильнокислотной обстановке переходят в подвижное состояние.

2. Химический состав стекловидной фазы шлака представлен преимущественно Si, Al, Ca, Fe, K, Mg, Ti, Ba. Каверные включения сульфидов шлака содержат такие элементы, как: S, Fe, Cu, Zn, Ni, Co.

3. Минералогический состав сульфидного террикона представлен кварцем, клинохлором, альбитом, мусковитом, гипсом, ярозитом и пиритом. В химическом отношении в составе сульфидного террикона присутствуют потенциально опасные элементы: As — 0,072%, S — 1,08%, Zn — 0,042%, Fe — 9,9%.

4. Под действием атмосферных осадков при формировании латерального и дифференциального аквального стока в условиях сопряженности двух техногенно-минеральных образований их влияние на окружающие ландшафты происходит в комплексном сочетании с аккумуляцией и миграцией токсичных элементов. Кислые стоки сульфидного террикона, действуя на силикатную матрицу шлака, вызывают процессы кислотного гидролиза. В результате образуются несколько зон окисления, как на поверхности, так и внутри отвала, с параллельным образованием щелочных барьеров. Таким образом, происходит высвобождение и миграция тяжелых металлов в одном стратиграфическом слое и дальнейшее их накопление в нижележащем. Со временем при смещении окислительных условий происходит перенос зоны окисления и высвобождение тяжелых металлов в сопряженные среды.

5. Таким образом, техногенно-минеральные образования, представленные как переработанной фазой основной полезной массы руды (шлаки), так и не переработанной побочной породой в ходе добычи, представляют особую опасность для экологического состояния региона размещения данных отходов.

6. Результаты данной работы могут способствовать пересмотру методов и способов хранения техногенных минеральных образований. Полученные в ходе работы данные по содержанию тяжелых металлов и минералогический состав дают представление об использовании складируемых шлаков в качестве сырья для вторичной переработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шабанов М. В.*, *Маричев М. С.*, *Манджиева С. С.*, *Соколов А. А.* Формирование хемоземов в условиях длительного воздействия аэропромышленных выбросов горно-металлургического комбината // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 727—740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.

2. *Шабанов М. В.*, *Маричев М. С.*, *Минкина Т. М.*, *Абдимуталип Н. А.* Роль горнообогатительного комбината в образовании техногеохимических аномалий мышьяка в почвах Соймоновской долины (Южный Урал) // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 632—643. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-632-643.

3. *Saikia N., Borah N. N., Konwar K., Vandecastelee C.* pH dependent leachings of some trace metals and metalloid species from lead smelter slag and their fate in natural geochemical environment // Groundwater for Sustainable Development. 2018, vol. 7, pp. 348—358. DOI: 10.1016/j.gsd.2018.01.009.

4. *Крупская Л., Куликова Е., Филатова М., Леоненко А.* Оценка воздействия техногенной системы на воздушный бассейн с применением методов математической статистики // Экология и промышленность России. — 2023. — № 27(8). — С. 50—57. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-8-50-57.

5. *Razorenov Yu. I., Klyuev R. V., Guzueva E. R.* Technogenic impact on the environment during leaching // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 1021, no. 1, article 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012050.

6. *Фоменко В. А., Соколов А. А., Мирошников А. С., Ранджан Ануж, Лукьянов А. С.* Развитие методов геоэкологического мониторинга эманаций радона на выведенных из эксплуатации хвостохранилищах горно-обогатительных комбинатов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 6. — С. 139—152. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_139.

7. *Куликова А. А.* Новый подход к оценке выбросов от горных предприятий с учетом углеродного следа // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 825—832. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832.

8. *Jin T., Liu Y., Yang Jackson D.* Leaching of cadmium, chromium, copper, lead, and zinc from two slag dumps with different environmental exposure periods under dynamic acidic condition // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2014, vol. 104, pp. 43—50. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.02.003.

9. *Shibayama A., Takasaki Y., William T., Yamatodani A., Higuchi Y., Sunagawa S., Ono E.* Treatment of smelting residue for arsenic removal and recovery of copper using pyrohydrometallurgical process // Journal of Hazardous Materials. 2010, vol. 181, pp. 1016—1023. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.116.

10. *Gorai B., Jana R.* Characteristics and utilisation of copper slag a review // Resources. Conservation and Recycling. 2003, vol. 39, pp. 299—313. DOI: 10.1016/S0921-3449(02)00171-4.

11. *Шабанов М. В., Маричев М. С.* Геохимические аномалии тяжелых металлов в почвах природных и антропогенных ландшафтов (на примере Красноуральского промузла) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 6. — С. 230—239. — DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3545 21.25.

12. *Макаров А. Б., Гуман О. М., Антонова И. А., Захаров А. В.* Трансформация геологической среды при разработке медноколчеданных месторождений Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 6. — С. 98—105. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-98-106.

13. *Kierczak J., Potysz A., Pietranik A., Tyszka R., Modelska M., Néel C., Ettler V., Mihaljevič M.* Environmental impact of the historical Cu smelting in the Rudawy Janowickie Mountains (southwestern Poland) // Journal of Geochemical Exploration. 2013, vol. 124, pp. 183—194. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.09.008

14. *Удачин В. А.* Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала: дис. ... докт. геол.-мин. наук. — Томск, ТПУ, 2012. — 249 с.

15. *Удачин В. И., Китагава Р., Вильямсон Б., Сугахара Т.* Руды и металлургические шлаки месторождений Карабаш (Южный Урал) и Ашио (Япония): состав и потенциальное воздействие на окружающую среду / Металлогения древних и современных океанов-2002. Формирование и освоение месторождений в офиолитовых зонах: Материалы Восьмой научной студенческой школы. — Миасс, 2002. — С. 267—275.

16. *Rouquette J., Kantor I., Mccammon C. A., Dmitriev V., Dubrovinsky L. S.* High-pressure studies of $(Mg_{0.9}Fe_{0.1})_2SiO_4$ olivine using raman spectroscopy, X-ray diffraction, and mössbauer spectroscopy // Inorganic Chemistry. 2008, vol. 47, no. 7, pp. 2668—2673. DOI: 10.1021/ic701983w.

17. *Fang Z., Wang E., Chen Y., Hou X., Chou K. C., Yang W., Chen J., Shang M.* Wurtzite AlN(0001) surface oxidation: Hints from Ab initio calculations // ACS Applied Materials & Interfaces. 2018, vol. 10, no. 36, pp. 30811—30818. DOI: 10.1021/acsami.8b08242.

18. *Маслобоев В. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Светлов А. В.* Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 3. — С. 138—153.

19. *Belogub E. V., Ayupova N. R., Krivovichev V. G., Novoselov K. A., Blinov I. A., Charykova M. V.* Se minerals in the continental and submarine oxidation zones of the South Urals volcanogenic-hosted massive sulfide deposits. A review // Ore Geology Reviews. 2020, vol. 122, article 103500. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103500.

20. *Semenkov I. N., Sharapova A. V., Lednev S. A., Koroleva T. V.* The fractional composition of compounds of metals and sulfur in the upper layer of soils of the impact zones of a coal mine (Central Russian forest-steppe) // Arid Ecosystems. 2023, no. 13, pp. 224—231. DOI: 10.1134/s2079096123020130.

21. *Cao J., Lu J., Jiang L., Wang Zhi* Oxidation behavior of metallurgical silicon slag under non-isothermal and isothermal conditions // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2016, vol. 124, pp. 593 – 599. DOI: 10.1007/s10973-015-5157-0.

22. *Freyssinet P. H., Piantone P., Azaroual M., Itard Y., Clozel-Leloup B., Guyonnet D.* Chemical changes and leachate mass balance of municipal solid waste bottom ash submitted to weathering // Waste Management. 2002, vol. 22, pp. 159 – 172. DOI: 10.1016 /s0956-053x(01)00065-4.

23. *Desborough G. A., Smith K. S., Lowers H. A., Swayze G. A., Hammarstrom J. M., Diehl S. F., Leinz R. W., Driscoll R. L.* Mineralogical and chemical characteristics of some natural jarosites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2010, vol. 74, no. 3, pp. 1041 – 1056. DOI: 10.1016/j.gca.2009.11.006.

24. *Bigham J. M., Schwetmann U., Traina S. J., Winland R. L., Wolf M.* Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1996, vol. 60, pp. 2111 – 2121. DOI: 10.1016/0016-7037(96)00091-9.

25. *Morrison A. L., Gulson B. L.* Preliminary findings of chemistry and bioaccessibility in base metal smelter slags // Science of the Total Environment. 2007, vol. 382, no. 1, pp. 30 – 42. DOI: 10. 1016/j.scitotenv.2007.03.034.

26. *Зиновьева О. М., Колесникова Л. А., Меркулова А. М., Смирнова Н. А.* К вопросу оценки экологического состояния окружающей среды для достижения устойчивого развития угледобывающих регионов России // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 35 – 43. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-35-43.

27. *Фоменко В. А., Соколов А. А., Лолаев А. Б., Аймбетова И. О.* Некоторые результаты работ по оценке эманаций радона Унальского хвостохранилища // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 4. – С. 576 – 585. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585. ГИАБ

REFERENCES

1. Shabanov M. V., Marichev M. S., Mangiyeva S. S., Sokolov A. A. Chemozem formation under conditions of prolong exposure to aero-industrial emissions from a mining and smelting plant. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 3, pp. 727 – 740. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.

2. Shabanov M. V., Marichev M. S., Minkina T. M., Abdimutalip N. A. The role of the mining and processing enterprise in the formation of techno-geochemical anomalies of arsenic in the soils of the Soymonovskaya Valley (Southern Urals). *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 4, pp. 632 – 643. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-632-643.

3. Saikia N., Borah N. N., Konwar K., Vandecastelee C. pH dependent leachings of some trace metals and metalloid species from lead smelter slag and their fate in natural geochemical environment. *Groundwater for Sustainable Development*. 2018, vol. 7, pp. 348 – 358. DOI: 10.1016/j.gsd.2018.01.009.

4. Krupskaya L., Kulikova E., Filatova M., Leonenko A. A Mathematical Model for Assessing the Impact of a Man-Made System on an Air Basin. *Ecology and Industry of Russia*. 2023, no. 27(8), pp. 50 – 57. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-8-50-57.

5. Razorenov Yu. I., Klyuev R. V., Guzueva E. R. Technogenic impact on the environment during leaching. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 1021, no. 1, article 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012050.

6. Fomenko V. A., Sokolov A. A., Miroshnikov A. S., Ranjan Anuj, Lukyanov A. S. Advancement of geoecological monitoring of radon emanations from out-of-service tailings dumps in mineral mining and processing industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 6, pp. 139 – 152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_139.

7. Kulikova A. A. A new approach to estimating emissions from mining enterprises, taking into account the carbon footprint. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 4, pp. 825 – 832. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832.

8. Jin T., Liu Y., Yang Jackson D. Leaching of cadmium, chromium, copper, lead, and zinc from two slag dumps with different environmental exposure periods under dynamic acidic condition. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014, vol. 104, pp. 43 – 50. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.02.003.

9. Shibayama A., Takasaki Y., William T., Yamatodani A., Higuchi Y., Sunagawa S., Ono E. Treatment of smelting residue for arsenic removal and recovery of copper using pyrohydrometallurgical process. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, vol. 181, pp. 1016 – 1023. DOI: 10.1016/j.jhazmat. 2010.05.116.

10. Gorai B., Jana R. Characteristics and utilisation of copper slag a review. *Resources. Conservation and Recycling*. 2003, vol. 39, pp. 299 – 313. DOI: 10.1016/S0921-3449(02)00171-4.

11. Shabanov M. V., Marichev M. S. Geochemical anomalies of heavy metals in soils of natural and anthropogenic landscapes (by the example of Krasnouralsky industrial area). Proceedings of Tomsk Polytechnic University. *Engineering of georesources*. 2022, vol. 333, no. 6, pp. 230 – 239. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3545 21.25.

12. Makarov A. B., Guman O. M., Antonova I. A., Zakharov A. V. Transformation of geological environment in copper pyrite mining in the Urals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 6, pp. 98 – 105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-98-106.

13. Kierczak J., Potysz A., Pietranik A., Tyszka R., Modelska M., Néel C., Ettler V., Mihaljevič M. Environmental impact of the historical Cu smelting in the Rudawy Janowickie Mountains (southwestern Poland). *Journal of Geochemical Exploration*. 2013, vol. 124, pp. 183 – 194. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.09.008

14. Udachin V. A. *Ekogeokhimiya gornopromyshlennogo tekhnogeneza Yuzhnogo Urala* [Ecogeochemistry of the mining technogenesis of the Southern Urals], Doctor's thesis, Tomsk, TPU, 2012, 249 p.

15. Udachin V. I., Kitagawa R., Williamson B., Sugahara T. Ores and metallurgical slags of Karabash (Southern Urals) and Ashio (Japan) deposits: composition and potential impact on the environment. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2002. Formirovanie i osvoenie mestorozhdeniy v ofiolitovykh zonakh: Materialy Vos'moy nauchnoy studencheskoy shkoly* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2002. Formation and development of deposits in ophiolite zones: materials of the Eighth Scientific Student School], Miass, 2002, pp. 267 – 275. [In Russ].

16. Rouquette J., Kantor I., Mccammon C. A., Dmitriev V., Dubrovinsky L. S. High-pressure studies of $(Mg_{0.9}Fe_{0.1})_2SiO_4$ olivine using raman spectroscopy, X-ray diffraction, and mössbauer spectroscopy. *Inorganic Chemistry*. 2008, vol. 47, no. 7, pp. 2668 – 2673. DOI: 10.1021/ic701983w.

17. Fang Z., Wang E., Chen Y., Hou X., Chou K. C., Yang W., Chen J., Shang M. Wurtzite AlN(0001) surface oxidation: Hints from Ab initio calculations. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018, vol. 10, no. 36, pp. 30811 – 30818. DOI: 10.1021/acsami.8b08242.

18. Masloboev V. A., Seleznev S. G., Makarov D. V., Svetlov A. V. Environmental hazard assessment of waste storage of copper-nickel ore mining and processing. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014, no. 3, pp. 138 – 153. [In Russ].

19. Belogub E. V., Ayupova N. R., Krivovichev V. G., Novoselov K. A., Blinov I. A., Charykova M. V. Se minerals in the continental and submarine oxidation zones of the South Urals volcanogenic-hosted massive sulfide deposits. A review. *Ore Geology Reviews*. 2020, vol. 122, article 103500. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103500.

20. Semenkov I. N., Sharapova A. V., Lednev S. A., Koroleva T. V. The fractional composition of compounds of metals and sulfur in the upper layer of soils of the impact zones of a coal mine (Central Russian forest-steppe). *Arid Ecosystems*. 2023, no. 13, pp. 224 – 231. DOI: 10.1134/s2079096123020130.

21. Cao J., Lu J., Jiang L., Wang Zhi Oxidation behavior of metallurgical silicon slag under non-isothermal and isothermal conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016, vol. 124, pp. 593 – 599. DOI: 10.1007/s10973-015-5157-0.

22. Freyssinet P. H., Piantone P., Azaroual M., Itard Y., Clozel-Leloup B., Guyonnet D. Chemical changes and leachate mass balance of municipal solid waste bottom ash submitted to weathering. *Waste Management*. 2002, vol. 22, pp. 159 – 172. DOI: 10.1016 /s0956-053x(01)00065-4.

23. Desborough G. A., Smith K. S., Lowers H. A., Swayze G. A., Hammarstrom J. M., Diehl S. F., Leinz R. W., Driscoll R. L. Mineralogical and chemical characteristics of some natural jarosites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010, vol. 74, no. 3, pp. 1041 – 1056. DOI: 10.1016/j.gca.2009.11.006.

24. Bigham J. M., Schwetmann U., Traina S. J., Winland R. L., Wolf M. Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996, vol. 60, pp. 2111 – 2121. DOI: 10.1016/0016-7037(96)00091-9.

25. Morrison A. L., Gulson B. L. Preliminary findings of chemistry and bioaccessibility in base metal smelter slags. *Science of the Total Environment*. 2007, vol. 382, no. 1, pp. 30 – 42. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.03.034.

26. Zinovieva O. M., Kolesnikova L. A., Merkulova A. M., Smirnova N. A. On the issue of assessing the ecological condition of the environment to achieve sustainable development of coal-mining

regions of Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 35 — 43. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-35-43.

27. Fomenko V. A., Sokolov A. A., Lolaev A. B., Aimbetova I. O. Some results of the work on the evaluation of radon emanations at Unal tailings. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 4, pp. 576 — 585. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шабанов Михаил Викторович[1] — канд. с.-х. наук,
доцент, доцент, e-mail: geohim.spb@gmail.com,
Scopus Author ID: 35171489500,
ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,
Маричев Максим Сергеевич[1] — канд. биол. наук,
зав. лабораторией, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru,
Scopus Author ID: 57216298057,
ORCID ID: 0000-0003-0429-2234,
Минкина Татьяна Михайловна — д-р биол. наук,
профессор, зав. кафедрой, Южный федеральный
университет, e-mail: minkina@sfedu.ru,
Scopus Author ID: 15063165400,
ORCID ID: 0000-0003-3022-0883,
Соколов Андрей Андреевич — канд. техн. наук,
доцент, зав. кафедрой, филиал Южного федерального
университета в Геленджике, e-mail: anso@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,
[1] Санкт-Петербургский государственный аграрный университет.
Для контактов: Маричев М.С., e-mail: m.s.marichev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.V. Shabanov[1], Cand. Sci. (Agr.), Assistant
Assistant Professor, e-mail: geohim.spb@gmail.com,
Scopus Author ID: 35171489500,
ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,
M.S. Marichev[1], Cand. Sci. (Biol.),
Head of Laboratory, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru,
Scopus Author ID: 57216298057,
ORCID ID: 0000-0003-0429-2234,
T.M. Minkina, Dr. Sci. (Biol.), Professor,
Head of Chair, Southern Federal University, 344006,
Rostov-on-Don, Russia, e-mail: minkina@sfedu.ru,
Scopus Author ID: 15063165400,
ORCID ID: 0000-0003-3022-0883,
A.A. Sokolov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Branch of Southern Federal University in Gelendzhik,
Gelendzhik, Russia, e-mail: anso@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,
[1] Saint-Petersburg State Agrarian University,
196605, Pushkin, Russia.
Corresponding author: M.S. Marichev, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru.

Получена редакцией 11.01.2024; получена после рецензии 14.02.2024; принята к печати 10.03.2024.
Received by the editors 11.01.2024; received after the review 14.02.2024; accepted for printing 10.03.2024.