

УДК 504.5:553.08:669.054.82

ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТВАЛЬНЫХ МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ

© 2018 г. А. Л. Котельникова, В. Ф. Рябинин

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mails: kotelnikova@prm.uran.ru, ryabininvf@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.02.2017 г.; принята к печати 02.07.2017 г.

В решении экологических вопросов и проблемы дефицита минерального сырья для медеплавильных предприятий перспективным является вовлечение в разработку отходов медеплавильного производства, в частности отвальных медных шлаков. Технология переработки последних включает дробление с последующим получением медного концентрата. В качестве отхода накапливается тонкодисперсный материал размерности ≤ 0.05 мм, содержащий около 3.4% цинка, 0.4 – меди, 0.4 – свинца, 35.0% – железа, так называемый “технический песок”. Для разработки новых способов извлечения полезных компонентов и утилизации отвальных шлаков необходимы определение минералов-концентраторов цветных металлов и изучение особенностей их пространственного распределения в обломках шлака, слагающих “технический песок”. Исследование вещественного состава “технического песка” Среднеуральского медеплавильного завода выполнено в Центре коллективного пользования “Геоаналитик” Института геологии и геохимии УрО РАН. С использованием электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 в обломках шлака, слагающих “технический песок”, установлены фазы fayalite, pyroxene, quartz, wustite, magnetite, hematite, matte, spaz и стекла. Во всех обнаруженных фазах рассчитан приблизительный баланс минералообразующих элементов. Рассмотрена возможность извлечения полезных компонентов из данного вида отходов с помощью гидрометаллургических методов.

Ключевые слова: минеральные отходы, медеплавильное производство, химический и фазовый состав

THE COMPOSITION FEATURES AND PERSPECTIVE OF USE FOR THE COPPER SLAG RECYCLING WASTE

Alla L. Kotelnikova, Viktor F. Ryabinin

*A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016, Russia,
e-mails: kotelnikova@prm.uran.ru, ryabininvf@mail.ru*

Received 01.02.2017 ; accepted 02.07.2017

In the solution of environmental problems and the shortage of mineral raw materials for copper smelting enterprises promising is the involvement in the development of waste copper smelting production, in particular the copper slag dump, processing technology which involves crushing followed by production of copper concentrate. Material with dimension of ≤ 0.05 mm containing about 3.4% zinc, 0.4% copper, 0.4% lead, 35.0% iron, so-called “technical sand” accumulates as a waste. For the development of new technologies of extraction of useful components and recycling of waste “technical sands”, a determination of minerals-concentrators of non-ferrous metals and studying the peculiarities of their spatial distribution in the wreckage of the slag, forming “technical sand” is needed. Study of a “technical sand” composition of the Sredneuralskii Copper Smelting Plant is made by the “Geoanalitik”, an analytical centre of the Ural Branch of RAS. Using electron microscopy the JSM-6390LV scanning electron microscope with INCA Energy 450 X-Max 80 attachment in the wreckage of a slag, forming “technical sand”, mineral phases of fayalite, pyroxene, quartz, wustite, magnetite, hematite, matte, spaz and glass have been determined. In all studied phases an approximate balance of mineral elements has been calculated. A possibility of the useful components’ extracting from this type of waste by hydrometallurgical methods is considered.

Keywords: mineral waste, copper smelting, chemical and phase composition

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of the State task on the topic of research Institute of Geology and Geochemistry Urals Branch of RAS № 0393-2018-0031.

Для цитирования: Котельникова А.Л., Рябинин В.Ф. (2018) Особенности вещественного состава и перспективы использования отхода вторичной переработки отвальных медеплавильных шлаков. *Литосфера*, 18(1), 133–139. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139

For citation: Kotelnikova A.L., Ryabinin V.F. (2018) The composition features and perspective of use for the copper slag recycling waste. *Litosfera*, 18(1), 133–139. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139

ВВЕДЕНИЕ

Вещественный состав литых отвальных медеплавильных шлаков изучался с XIX в. В XX в. большой вклад в их исследование внесли В.В. Лаппин [1945, 1960], Д.С. Белянкин [1956], А.В. Ванюков, В.Я. Зайцев [1969] и др. Для литых отвальных медеплавильных шлаков описано более трех десятков минералов.

Характерный для медеплавильных шлаков химический состав, минеральные ассоциации, формы нахождения металлов, своеобразная текстура определяются химическим и минеральным составом исходной руды и применяемых флюсов. Дополнительное влияние оказывают параметры физико-химических процессов и подшихтовка на всех технологических стадиях получения черновой меди.

В последние десятилетия XX в. в изменившихся экономических условиях некоторые медеплавильные заводы начали переработку литых отвальных шлаков. На Урале ее ведут Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ), Кировоградский медеплавильный комбинат и комбинат “Карабашмедь” (КМК).

Технология переработки литого медеплавильного шлака включает его дробление с последующим получением медного концентрата. Шлак размалывают до следующей крупности частиц: 0.21–0.10 мм – 1.1–4.1%, 0.10–0.05 мм – 21.0–30.0%, <0.05 мм – 69.0–75.0%. Полнота извлечения меди, по данным ОАО СУМЗ, составляет 60–65%. В качестве отхода накапливается тонкодисперсный материал размерности ≤0.05 мм – так называемый “технический песок”.

К настоящему времени только на ОАО СУМЗ накоплено более 10 млн т “технического песка”, в котором сконцентрировано, по нашим ориентировочным оценкам, 340 тыс. т цинка, 43 тыс. т меди, 43 тыс. т свинца, 3.5 млн т железа. Это позволяет рассматривать данный вид отхода как потенциальное минеральное сырье.

Для извлечения полезных компонентов необходим поиск нетрадиционных технологий переработки “песка”. Решение технологических проблем неразрывно связано с определением минералов-концентраторов цветных металлов и изучением особенностей их пространственного распределения в обломках шлака, слагающих “технический песок”.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в Институте геологии и геохимии УрО РАН. Определение химического состава проводили с использованием рентгенофлуоресцентного микроанализатора XRF-1800 и рентгеноспектрального микроанализатора СРМ-35. Микроэлементный состав “технического песка” определен методом масс-спектрометрии с индук-

тивно связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре Elan-9000 с приставкой для лазерной абляции LSX-500, 260 nm. Фазовый состав проб устанавливали с помощью дифрактометра ДРОН-3.

В обычных случаях исследование минерального состава медеплавильного шлака выполняется в прозрачных или полированных шлифах. При этом изучаются относительно крупные и сравнительно хорошо гомогенизированные индивиды минералов, погруженные в матрицу железосиликатного стекла [Ерохин, Козлов, 2010, 2013; Ерохин и др., 2011]. В разной степени раскристаллизованное стекло слагает преобладающий объем кислых и среднекислых медеплавильных шлаков [Санакулов, Хасанов, 2007].

В образующихся в качестве отхода переработки шлака хвостах (“техническом песке”) обломочный материал представлен преимущественно стеклом, включающим обильную россыпь еще формирующихся минеральных индивидов, находящихся на разных стадиях гомогенизации состава. Мы определяли состав именно таких мелких минеральных фаз, рассеянных в железосиликатном стекле. Исследования проводили с использованием электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80. Параметры работы: увеличение от 200 до 750, размер точки 0.5–1.0 мкм, ускоряющее напряжение 20 кВ, поле зрения до 100 мкм.

Поскольку необходимое для исследования таблетирование тонкодисперсного материала “технического песка” оказалось затруднительным, подготовку образцов проводили по методике М.В. Рыльниковой с соавторами [2013]. Она включала предварительное окомкование с использованием негашеной извести и 2% серной кислоты. Всего изучено 143 зерна.

Данные по химическому и фазовому составу “технического песка” СУМЗ приведены в табл. 1, 2. Следует отметить, что при стандартной технологии получения отходов химический и минеральный состав несколько различается в каждой новой партии. Это связано как с составом исходного литого шлака и условиями анализа, так и с приборной составляющей.

В исследованных обломках методом электронной микроскопии установлено обособление фаз состава фаялита, пироксенов, кварца, вюстита, магнетита, гематита, а также штейна и шпейзы (рис. 1, 2). Измерялись и составы самого стекла. Для решения вопроса о распределении цветных металлов по минеральным фазам мы рассчитали приблизительный баланс минералообразующих элементов (без учета кислорода) во всех обнаруженных фазах (табл. 3). При вычислениях использовали среднеарифметические значения содержания элементов в мине-

Таблица 1. Данные химического анализа “технического песка” СУМЗ, мас. %

Table 1. SUMZ “sands” compositions, wt %

Элемент	1	2	Элемент	1	2
SiO ₂	32.67	31.0	As	—	0.53
Al ₂ O ₃	5.15	7.05	Ba	—	0.43
Fe ₂ O ₃	11.14	14.29	Ni	—	0.001
FeO	36.76	32.3	V	—	0.004
TiO ₂	0.20	0.26	Mo	—	0.02
MnO	0.09	0.09	Y, г/т	—	7.89
CaO	3.63	4.53	Ag, г/т	—	3.39
MgO	1.57	1.64	Bi, г/т	—	2.38
K ₂ O	0.72	0.74	Sc, г/т	—	4.23
Na ₂ O	0.62	0.64	Re, г/т	—	0.06
P ₂ O ₅	0.16	0.18	Ta, г/т	—	0.41
Cu	—	0.44	Сумма	—	102.83
Zn	3.94	3.28			
Pb	—	0.20			
S	0.81	1.32			
H ₂ O	0.18	—			
Сумма	99.82	—			

Примечание. 1 – Институт минералогии УрО РАН, 2 – ИГТ УрО РАН. Здесь и в табл. 2, 3 прочерк – нет данных.

Note. 1 – Institute of Mineralogy RAS UB, 2 – IGG UB RAS. Here and in tables 2, 3 dash – no data.

Таблица 2. Фазовый состав “технических песков” СУМЗ, мас. %

Table 2. The detected phase’s ability in SUMZ “sands”, wt %

Минерал	1	2
Магнетит Fe ₃ O ₄	5.0	3.5
Пирротин FeSn + 1	1.0	1.0
Фаялит Fe ₂ SiO ₄	45.0	45.0
Феррит цинка	8.0	—
Борнит Cu ₅ FeS ₄	0.5	0.5
Ковеллин CuS	0.6	0.5
Куприт CuO	0.3	0.5
Пирит FeS ₂	—	1.0
Минерал	1	2
Волластонит	—	—
Виллемит Zn ₂ SiO ₄	—	8.0
Шпинель MgAl ₂ O ₄	—	—
Стекло	34	30.0
Кварц SiO ₂	—	1.0
Диопсид CaZn(Si ₂ O ₆)	—	8.0
Прочие	5.6	—
Итого	100	99.0

Примечания. 1 – по справке СУМЗ за 1997 г., 2 – наши данные РФА.

Note. 1 – SUMZ data, 1997, 2 – our data, X-ray phase analyses.

ральных фазах и данные рентгенофазового анализа (см. табл. 2). При этом мы полагали, что виллемит образует твердый раствор с фаялитом, диопсид представляет группу пироксенов, куприт входит в

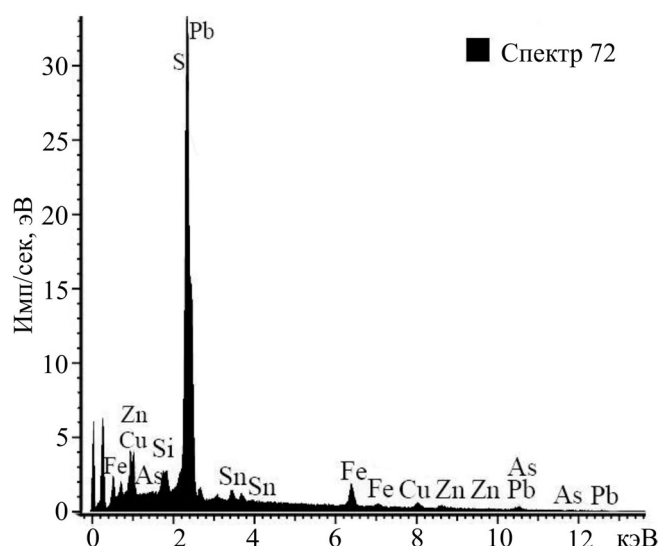
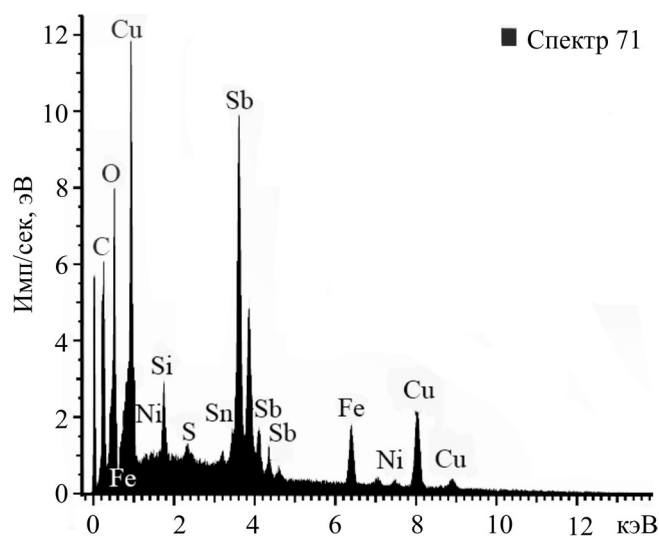
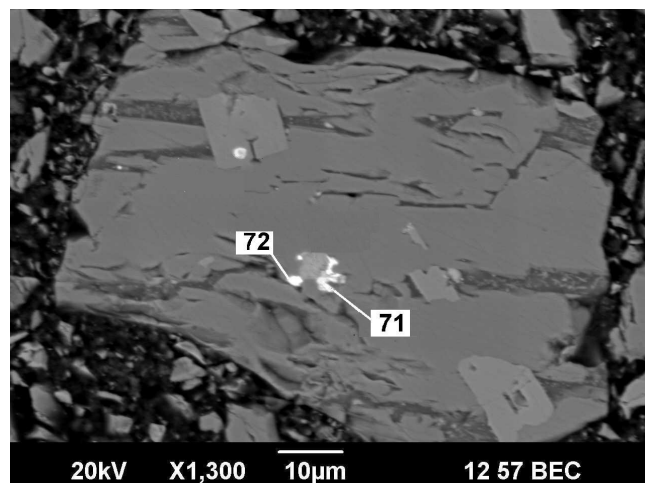


Рис. 1. Обособления шпейзы (спектр 71) и штейна (спектр 72).

Fig. 1. Spaza (point 71) and Stein (point 72) and appropriate spectra.

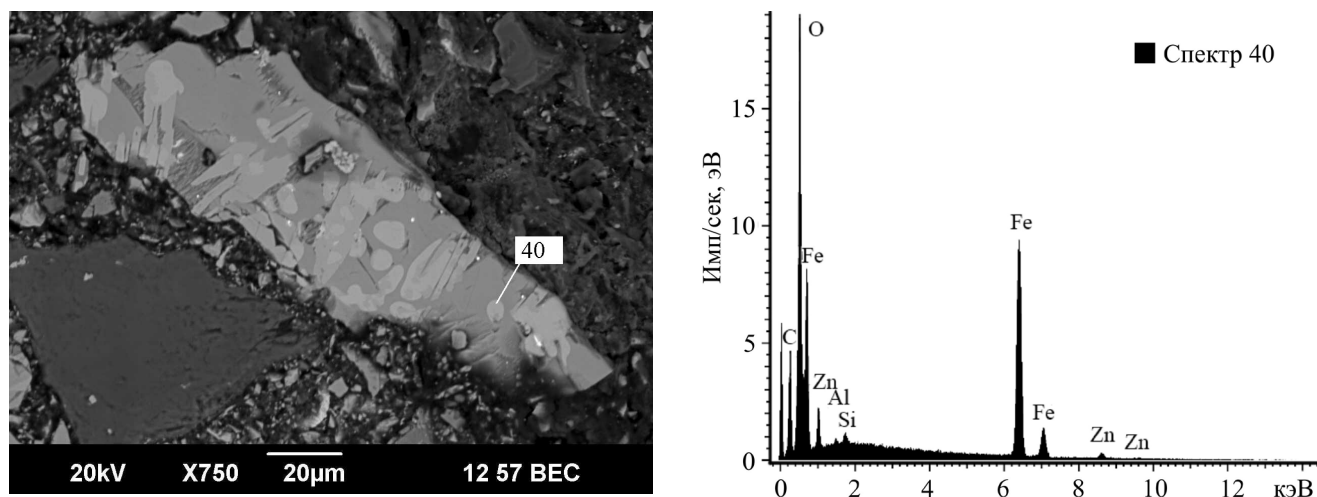


Рис. 2. Каплевидные обособления вюститового состава (спектр 40).

Fig. 2. Teardrop-shaped wustite grains (point 40) and appropriate spectra.

Таблица 3. Баланс распределения элементов по минеральным фазам “технического песка” СУМЗ, мас. %

Table 3. Chemical elements distributing between SUMZ slag “sands” phases, wt %

Фазовый состав “песка” с учетом данных РФА	Относительное содержание													
	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Sn	Sb	Pb
Фаялит (53.0)	—	22.36	16.14	0.34	5.67	7.35	47.69	—	—	35.71	—	—	—	—
Пироксен (8.0)	1.56	0.03	4.29	—	—	0.84	6.01	—	—	—	—	—	—	—
Кварц (1.0)	—	0.0	1.20	—	—	0.02	0.01	—	—	—	—	—	—	—
Стеклофаза (30.0)	98.43	70.42	60.54	1.32	94.29	73.06	14.33	—	—	18.42	—	21.02	—	95.97
Вюстит (0.5)	—	0.02	0.01	—	—	—	0.72	—	—	0.31	—	—	—	—
Гематит (0.5)	—	0.17	0.09	—	—	—	0.58	—	—	0.10	—	0.14	—	—
Магнетит (3.5)	—	2.67	0.10	—	—	—	4.32	—	—	1.95	—	1.07	—	—
Штейн (сульфиды) (3.0)	—	4.21	17.59	98.32	—	18.53	26.20	—	99.59	43.31	46.84	73.70	—	—
Шпейза (0.5)	—	0.10	0.04	—	0.03	0.03	0.15	100.00	0.41	0.04	53.16	4.07	100.00	4.03

состав оксидов. Недостаток по массе металлов может компенсироваться присутствием интерметаллидов. Следует подчеркнуть, что полученные расчетные данные ориентировочные и требуют уточнения, но в целом применимы при разработке технологической схемы извлечения цветных металлов из “технического песка”.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В литых медеплавильных шлаках СУМЗ описаны фаялит, пироксен, стеклофаза кислого и основного состава, магнетит, гематит, сульфиды, кварц, оксиды металлов, в том числе куприт и металлическая фаза, включающая медь, никель и железо [Ерохин, Козлов, 2010, 2013; Ерохин и др., 2011]. Наблюдались также вторичные минералы – гидроксид железа, сульфаты железа и меди.

В работе [Ванюков, Зайцев, 1969] сообщается, что Zn присутствует как примесь в силикатах и маг-

нетите, а также обособливается в форме сульфидов. Медь в шлаках может находиться в виде примеси в силикатах, а также содержаться в форме оксида, сульфида или металла. Соотношение между формами нахождения меди в шлаках может быть различным в зависимости от состава шлака и условий его остывания.

По наблюдениям Ю.В. Ерохина и П.С. Козлова [2010], стекла основного состава, содержащие около 40% SiO_2 , характеризуются повышенной концентрацией ZnO (3.78%) и FeO (22.42%). В кислых стеклах, содержащих более 60% SiO_2 , наблюдается более низкая концентрация ZnO (1.18%) и FeO (5.50), в то время как содержание CuO около 1.00% [Ерохин, Козлов, 2013]. Кроме того, обнаружены так называемые свинцовые стекла с содержанием PbO более 30.00% и CuO до 1.00% [Ерохин и др., 2011].

Указывается, что Ni, Co, Pb и Sn, как правило, присутствуют в пироксенах и стеклах кислого состава [Санакулов, Хасанов, 2007; Ерохин и др.,

2011; Ерохин, Козлов, 2013]. Формы нахождения Ni и Co – **сульфиды и оксиды**, Pb – **сульфиды и арсениды**. Олово наблюдалось в виде оксидов. Помимо того Co, Pb и Sn **отмечались и в виде металлических королек**. Полученные нами данные дополняют имеющиеся сведения в части описания рассеянной тонкой минеральной вкрапленности в железосиликатном стекле, представляющем основную массу обломочного материала “технических песков”.

Как отмечалось, при подготовке отвального медеплавильного шлака к флотационной переработке его предварительно измельчают. При дроблении минеральные индивиды подвергаются упруго-пластическим деформациям за счет термических и механических напряжений. Происходит их активация, связанная с протеканием меанохимических и полиморфных превращений [Перепелицын, 1987].

В результате флотации металлической и сульфидной меди химический и минеральный состав “песка” изменяется: содержание меди, серы и хорошо растворимых щелочных элементов снижается. Как уже отмечалось, полнота извлечения меди по данным ОАО СУМЗ составляет 60–65%. За счет воздействия воды и атмосферных агентов возрастает содержание сульфатов и гидроксидов металлов. Возможно образование сераорганических соединений.

Мы установили, что составы пироксенов, слагающих наряду со стеклом основной объем обломочного материала в исследованном образце “технического песка” СУМЗ, преимущественно близки к ферросиликатам $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ и (или) бронзиту $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$. Недостаток Fe^{2+} в них компенсируется присутствием Ca, Mg и Zn. Энстатитовая компонента в ферросиликатах присутствует в количестве 5–6 мол. %. Единичные зерна удовлетворительно пересчитываются на состав авгита, пиджонита и геденбергита.

Составы фаялитов заметно отклоняются от стехиометрических. Железо частично замещено цинком и кальцием. Наблюдаемый избыток алюминия и кислорода предположительно объясняется присутствием тонкой вкрапленности шпинели, что обусловлено спецификой условий распада твердого раствора фаялитового состава.

Силикатные составы, удовлетворительно не пересчитываемые ни на формулу пироксенов, ни на формулу оливина, мы отнесли к стеклофазе. Таки-ми фазами представлено около 30.0% измеренных зерен. Алумосиликатная стеклофаза обогащена Fe (около 7 мас. %), магнием (до 8) и Ca (до 5 мас. %). В стеклах постоянно присутствуют сопоставимые с пироксенами количества Zn. Часто наблюдается Cu. В отличие от пироксенов здесь отмечается более широкий круг примесей, в том числе Ba. Однозначно идентифицируются мелкие зерна кварца – примерно 3.5% от общего числа.

Мы наблюдали каплевидные выделения 3–8 мкм, отвечающие составу вюститита – около 8.0% от числа измеренных зерен. В них присутствует Zn – от 3.2 до 4.4 мас. %. Во всех вюстититах установлено присутствие Si – от 0.6 до 1.4 мас. %, что можно объяснить наличием в них тонких рассеянных обособлений не идентифицируемой силикатной фазы.

Фазы, удовлетворительно пересчитываемые на магнетит и гематит, представляют около 20.0% от количества измеренных зерен. Преобладают составы гематита. Для обоих постоянно присутствие Al и Zn.

Характерным для шлаков является присутствие капель (до 2 мкм) штейна. Встречаются как составы с преобладанием Pb (галенит), так и Fe-Cu-составы (смесь пирита и халькопирита). Наблюдались капли 1–2 мкм шпейзы – интерметаллидов на основе сурьмы или мышьяка.

Помимо того в образцах “технических песков” отмечены единичные минеральные индивиды, удовлетворительно пересчитываемые на смесь сульфатов кальция, железа, меди, цинка, иногда свинца. Предположительно они образовывались в ходе подготовки образцов для исследований. Их появление также могло быть связано с окислением соответствующих сульфидов на заключительных стадиях остывания шлака в процессе гипергенного преобразования медеплавильного шлака и “технического песка” при хранении в местах складирования. Так, по данным заводских НИР СУМЗ, до 0.6% цинка в литом отвальном шлаке находятся в сульфатной форме.

Согласно наблюдениям В.И. Смирнова [1952] и результатам заводских НИР, при обжиге некоторое количество меди и цинка переходит в ферриты. Формирование ферритов цинка и меди также возможно при распаде твердого раствора магнетита в результате метаморфических процессов в шлаковом отвале при повторном разогревании шлака. В исследованных нами образцах песка ферриты меди или цинка в виде обособленных зерен не обнаружены.

По нашему мнению, кристаллизация цинковых минералов франклинита и виллемита в присутствии цинксодержащих магнетита и фаялита маловероятна, поскольку в этом случае образуются их твердые растворы в магнетите и фаялите соответственно. Особенностью мелких выделений минералов, наблюдаемых нами в обломочном материале железосиликатного стекла, составляющего основной объем “технического песка”, являются заметные отклонения их составов от стехиометрических. Далее приведены приближенные варианты составов, рассчитанные с учетом общей схемы структурных формул минералов: оксидов – A^{2+}O , $\text{A}^{2+}[\text{B}^{3+}]_2\text{O}_4$, $[\text{B}^{3+}]_2\text{O}_3$, фаялита (ортосиликата) – $\text{A}_2^{2+}[\text{SiO}_4]$, пироксена (метасиликата) – $\text{A}_2^{2+} \text{B}^{3+}[\text{SiO}_3]_2$, где А и В – двух- и трехвалентные катионы.

1. Кварц SiO_2 с эпизодически встречающимися примесями Ca, Fe.

2. Фаялит ($\text{Fe}_{1.64}, \text{Ca}_{0.04}, \text{Zn}_{0.15}$)($\text{Si}_{0.85}, \text{Al}_{0.27}$) O_4 .
3. Вюстит ($\text{Fe}_{0.9}, \text{Al}_{0.02}, \text{Si}_{0.01}, \text{Zn}_{0.04}$) O .
4. Магнетит ($\text{Fe}_{2.8}, \text{Al}_{0.5}, \text{Si}_{0.1}, \text{Zn}_{0.1}$) O_4 , эпизодически присутствовали Cr, Ti, Cd, Sn.
5. Гематит ($\text{Fe}, \text{Al}, \text{Si}_{0.4}$) O_3 с эпизодически встречающимися примесями Zn, S, Sn.
6. Пироксены ($\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Zn}$) $_{2.0} \text{Si}_{1.9} \text{O}_{6.0}$, эпизодически встречался Al.
7. Штейн – смеси сульфидов, пересчитываются на составы ($\text{Pb}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zn}, \text{Si}_{0.08}, \text{Sn}_{0.07}$)S, $\text{FeS} \cdot \text{Cu}_2\text{S}$, ($\text{Pb}, \text{Fe}, \text{Cu}$) $_{1.06} \text{S}$, ($\text{Pb}, \text{Fe}, \text{Si}_{0.44}, \text{Ca}_{0.18}$) $_{1.1} \text{S}$.
8. Сульфаты ($\text{Ca}_{0.74}, \text{Na}, \text{Al}, \text{Mg}$) SO_4 .

Анализ баланса распределения минералообразующих элементов в обнаруженных нами фазах показал неравномерность их распределения. Цинк присутствует во всех фазах, но большая его часть – около 43% – сконцентрирована в штейне в виде сульфидов. Силикатный цинк заключен в фаялите и стеклофазе. Другие тяжелые и цветные металлы, включая медь, сосредоточены в штейне и шпейзе в виде сульфидов и интерметаллидов. Основная масса щелочных и щелочноземельных элементов, алюминий и кремний находятся в стеклофазе. Около 50% железа содержится в фаялите. Практически все силикаты, а также оксиды железа содержат примесь цинка и, нередко, меди.

Все ранее проведенные нами анализы валового состава “технического песка” показывали присутствие в нем кадмия, селена, теллура и висмута, но минеральные фазы, имеющие в составе эти элементы, мы не обнаружили. В исследованном обломочном материале также не наблюдалось включений металлической меди.

Выявленные особенности распределения полезных компонентов в изученном нами материале “технического песка” обуславливают необходимость разработки комплексных способов их извлечения. Наиболее экономически и энергетически оправданным является гидрометаллургический метод переработки “песка”. При разработке технологических схем извлечения цинка и меди следует учитывать то, что более 50% цинка и 95% свинца заключено в силикатах, а практически вся медь сконцентрирована в сульфидах и интерметаллидах.

ВЫВОДЫ

В результате исследования получены оценочные данные о вещественном составе “технического песка” ОАО СУМЗ. Определены основные фазы-концентраторы цветных металлов, в частности меди, цинка и свинца. Получены ориентировочные данные по их распределению в минеральных фазах.

Установлено, что тяжелые и цветные металлы, включая медь, преимущественно сосредоточены в штейне и шпейзе в виде сульфидов и интерметаллидов. Цинк наблюдается во всех фазах: около 43%

в штейне в виде сульфидов, более 50% в виде изоморфной примеси в фаялите и стекле. Основная масса щелочных и щелочноземельных элементов, алюминий и кремний находятся в стеклофазе. Около 50% железа заключено в фаялите.

Полученные результаты позволяют утверждать, что эффективное извлечение сульфидной меди и цинка возможно в окислительных условиях в кислой среде, что подтверждено экспериментально [Котельникова и др., 2014; Реутов и др., 2015]. Для извлечения цинка и свинца из силикатов, по видимому, необходимо предварительное обескремнивание силикатных фаз.

Экспериментально установленная [Котельникова и др., 2014] возможность извлечения полезных компонентов из “технических песков” с использованием гидрометаллургических подходов позволяет рассматривать данный вид отходов в качестве дополнительного комплексного минерального сырья для цветной металлургии. Выявленные особенности в распределении полезных компонентов в минеральных фазах могут послужить основой для технологических решений.

Исследования выполнены в рамках темы № 0393-2018-0031 государственного задания ИГТ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белянкин Д.С. (1956) Избранные труды. Т. 1. М.: АН СССР, 844 с.
- Ванюков А.В., Зайцев В.Я. (1969) Шлаки и штейны цветной металлургии. М.: Металлургия, 408 с.
- Ерохин Ю.В., Козлов П.С. (2010) Фаялит из шлаков Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда). *Минералогия техногенеза – 2010*. Миасс: ИМин УрО РАН, 32-40.
- Ерохин Ю.В., Козлов П.С. (2013) Магнетитовый шлак из Среднеуральского медеплавильного завода. *Минералогия техногенеза – 2013*. Миасс: ИМин УрО РАН, 29-37.
- Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Хиллер В.В. (2011) Купритовый шлак из Среднеуральского медеплавильного завода. *Минералогия техногенеза – 2011*. Миасс: ИМин УрО РАН, 26-38.
- Котельникова А.Л., Рябинин И.Ф., Кориневская Г.Г., Халезов Б.Д., Реутов Д.С., Муфтахов В.А. (2014) К вопросу рационального использования отходов переработки медеплавильных шлаков. *Недропользование. XXI век*, 6(50), 14-19.
- Лапин В.В. (1945) Материалы по петрографии шлаков советской металлургии. *Тр. ИГН АН СССР. Петр. сер.*, (77), 25 с.
- Лапин В.В. (1950) Петрография металлургических и топливных шлаков. М.: АН СССР, 326 с.
- Перепелицын В.А. (1987) Основы технической минералогии и петрографии. М.: Недра, 255 с.
- Реутов Д.С., Котельникова А.Л., Халезов Б.Д., Кориневская Г.Г. (2015) Поиск технологии извлечения цинка, меди и утилизации песков из твердых отходов, полученных после флотации медеплавильных шлаков. *Проблемы недропользования*, 2(5), 79-84.

- Рыльникова М.В., Емельяненко Е.А., Ангелова Е.А. (2013) Технология подготовки дисперсного техногенного сырья медноколчеданных месторождений к выщелачиванию. *Технологическая платформа "Твердые полезные ископаемые": технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений*. Екатеринбург: АМБ, 54-55.
- Санакулов К.С., Хасанов А.С. (2007) Переработка шлаков медного производства. Ташкент: Фан, 206 с.
- Смирнов В.И. (1952) Отражательная плавка (теория и практика). Свердловск: Металлургиздат, 326 с.

REFERENCES

- Belyankin D.S. (1956) *Izbrannye trudy. T. 1* [Selected Works. V. 1.]. Moscow, Akad. Nauk SSSR, 844 p. (In Russian)
- Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. (2010) Fayalite in the Sredneural'sky cooper smelter slag (town of Revda). *Mineralogy of technogenesis – 2010*. Miass, Institute of Mineralogy Urals Branch of RAS, 32-40. (In Russian)
- Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. (2013) Magnetite slags of the Sredneural'sky cooper smeltery. *Mineralogy of technogenesis – 2013*. Miass, Institute of Mineralogy RAS, Urals Branch, 29-37. (In Russian)
- Erokhin Ju.V., Kozlov P.S., Khiller V.V. (2011) Cuprite slag from the Sredneural'sky cooper smelter. *Mineralogy of technogenesis – 2011*. Miass, Institute of Mineralogy RAS, Urals Branch, 26-38. (In Russian)
- Kotel'nikova A.L., Ryabinin V.F., Korinevskaya G.G., Khalezov B.D., Reutov D.S., Mouftakhov V.A. (2014) On the issue of rational use of waste products for processing copper smelting slags. *Nedropolzovanie. XXI vek*, 6(50), 14-19. (In Russian)
- Lapin V.V. (1945) *Materialy po petrografii shlakov sovetskoi metallurgii* [Materials on the petrography of slags of Soviet metallurgy]. *Tr. IGN AN SSSR. Petr. Ser.*, (77), 25 p. (In Russian)
- Lapin V.V. (1950) *Petrografiya metallurgicheskikh i toplivnykh shlakov* [Petrography of metallurgical and fuel slags]. Moscow, Akad. Nauk SSSR, 326 p. (In Russian)
- Perepelitsin V.A. (1987) *Osnovy tekhnicheskoi mineralogii i petrografii* [Fundamentals of technical Mineralogy and petrography]. Moscow, Nedra Publ., 255 p. (In Russian)
- Reutov D.S., Kotel'nikova A.L., Khalezov B.D., Korinevskaya G.G. (2015) Search for technology of extraction of zinc, copper and utilization of sands from solid waste, obtained after flotation of copper smelting slags. *Problemy nedropolzovaniya*, 2(5), 79-84. (In Russian)
- Rylnikova M.V., Emel'yanenko E.A., Angelova E.A. (2013) Technology of preparation of dispersed technogenic raw materials of the copper-pyrite deposits to leaching. *Tekhnologicheskaya platforma "Tverdye poleznye iskopaemye": tekhnologicheskie i ekologicheskie problemy obrabotki prirodnnykh i tekhnogennykh mestorozhdenii* [Technological platform "Solid minerals": Technological and environmental problems of mining natural and technogenic deposits]. Ekaterinburg, AMB Publ., 54-55. (In Russian)
- Sanakulov K.S., Khasanov A.S. (2007) *Pererabotka shlakov mednogo proizvodstva* [Processing of slag in copper production]. Tashkent, Fan Publ., 206 p. (In Russian)
- Smirnov V.I. (1952) *Otrazhatel'naya plavka (teoriya i praktika)* [Reflective melting (theory and practice)]. Sverdlovsk, 326 p. (In Russian)
- Vanyukov A.V., Zaitsev V.Ya. (1969) *Shlaki i shteyny tsvetnoi metallurgii* [Slag and mattes of nonferrous metallurgy]. Moscow, Metallurgy Publ., 408 p. (In Russian)