

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
FOUNDRY ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87



ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ШЛАКОВ СРЕДНЕУРАЛЬСКОГО
МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА

Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Леонова Л.В.

Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Среднеуральский медеплавильный завод является крупным производителем черновой меди, серной кислоты и суперфосфатных удобрений. За почти 100 лет работы на предприятии скопилось огромное количество шлаков, в том числе и медеплавильного производства. На данный момент завод занимается активной переработкой камнеподобных (литых) шлаков, выделяя из них сульфидный концентрат с благородными металлами. В результате дробления на предприятии формируются новые отвальные массы в виде пылевидного черного шлака. Для разработки технологии дальнейшей утилизации этих масс требуется детальная информация о минеральном составе шлаков. К сожалению, вещественный состав шлаков СУМЗа, полученный предыдущими исследователями, выглядит достаточно противоречивым и требует пересмотра. **Цель работы.** Изучение вещественного (минерального) состава шлаков Среднеуральского медеплавильного завода, полученных при проплавке медноколчеданных руд. **Используемые методы.** Химический состав шлака установлен на рентгенофлуоресцентном волновом спектрометре XRF 1800 фирмы Shimadzu, а состав минералов определен на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГГ УрО РАН). На последнем приборе сделаны и фотографии минералов. **Новизна.** Рассмотрение вещественного состава шлаков проводилось с применением современной номенклатуры Комиссии по новым минералам Международной минералогической ассоциации и использованием методов классической минералогии. **Результат.** Нами рассмотрена и существенно дополнена минералогия литых шлаков Среднеуральского медеплавильного завода. Установлено, что они сложены фаялитом и железистым авгитом с присутствием магнетита, стекла и хромшпинелида (хромита и магнезиохромита). Сульфидная составляющая в основном представлена кубанитом и борнитом, реже идаитом, сфалеритом, галенитом и Zn-аналогом кубанита. Кроме того, отмечается арсенидно-стибнидная минерализация, сложенная брейтгауптитом, вестервельдитом, купростибитом и алларгентумом. Металлы и интерметаллиды, соответственно, представлены медью и аурикупридом. **Практическая значимость.** Изученные медные шлаки пускают в дополнительную переработку, так как они содержат большое количество сульфидов меди и цинка, а также примесь золота и серебра. Попутно из этих шлаков можно добывать магнетитовый концентрат, что позволит на 20% уменьшить объем отвалов. В целом пылевидные шлаки можно рассматривать как техногенную железную руду. К сожалению, технологии выделения железа из силикатов пока слишком затратные, но если учесть что попутно выделяемые цинк, медь и другие элементы, то, возможно, это станет рентабельно.

Ключевые слова: фаялит, авгит, магнетит, сульфиды, минералогия, шлаки, Среднеуральский медеплавильный завод

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Свердловской области № 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>

© Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Леонова Л.В., 2025

Для цитирования

Вещественный состав шлаков Среднеуральского медеплавильного завода / Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Леонова Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 78-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATERIAL COMPOSITION OF SLAG FROM THE SREDNEURALSК COPPER SMELTER

Erokhin Yu.V., Kozlov P.S., Zakharov A.V., Shiryaev P.B., Leonova L.V.

Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The Sredneuralsk Copper Smelter is a major producer of black copper, sulfuric acid and superphosphate fertilizers. Over almost 100 years of operation, the plant has accumulated a huge amount of slag, including copper smelting production. At the moment, the plant is actively processing rock-like (cast) slags, extracting sulfide concentrate with precious metals from them. As a result of crushing, new waste masses are formed at the plant in the form of dusty black slag. Further utilization of these masses requires a detailed understanding of the mineral composition of the slags. Unfortunately, the material composition of the SUCS slags obtained by previous researchers looks quite contradictory and requires revision. **Objectives.** Study of the material (mineral) composition of slags from the Sredneuralsk copper smelter obtained during the smelting of copper-sulphide ores. **Methods Applied.** The chemical composition of the slag was determined using an XRF 1800 X-ray fluorescence wave spectrometer from Shimadzu, and the composition of the minerals was determined using a TESCAN MIRA LMS, S6123 scanning electron microscope with an INCA Energy 450 X-Max 80 energy dispersive device from Oxford Instruments (IGG UBr RAS). The latter device was also used to take photographs of the minerals. **Originality.** The examination of the material composition of slags was carried out using the modern nomenclature of the Commission on New Minerals of the International Mineralogical Association and using the methods of classical mineralogy. **Results.** We have examined and supplemented the mineralogy of cast slags of the Sredneuralsk copper smelter. It has been established that they are composed of fayalite and ferrous augite with the presence of magnetite, glass and chrome spinelide (chromite and magnesiochromite). The sulfide component is mainly represented by cubanite and bornite, less often by idaite, sphalerite, galena and Zn-analogue of cubanite. In addition, arsenide-stibnite mineralization is noted, composed of breithauptite, westerveldite, cuprostibite and allargentum. Metals and intermetallides are respectively represented by copper and auricupride. **Practical Relevance.** The studied copper slags are sent for additional processing, since they contain a large amount of copper and zinc sulfides, as well as an admixture of gold and silver. At the same time, magnetite concentrate can be extracted from these slags, which will reduce the volume of waste dumps by 20%. In general, dusty slags can be considered as man-made iron ore. Unfortunately, the technologies for extracting iron from silicates are still too expensive, but if to take into account the zinc, copper and other elements that are extracted along the way, then perhaps it will become profitable.

Keywords: fayalite, augite, magnetite, sulfides, mineralogy, slags, Sredneuralsk Copper Smelter

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation and the Government of the Sverdlovsk region No. 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>

For citation

Erokhin Yu.V., Kozlov P.S., Zakharov A.V., Shiryaev P.B., Leonova L.V. Material Composition of Slag from the Sredneuralsk Copper Smelter. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 78-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87>

Введение

Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ) расположен в Свердловской области и находится на северной окраине г. Ревда. Предприятие решили построить в 1931 году на базе рядом расположенного Дегтярского медноколчеданного месторождения, разработка которого началась в 1914 году. В 1937 году при заводе запустили обогатительную фабрику, а выплавка меди началась только спустя три года. В период Великой Отечественной войны завод работал с перерывами и с трудом (из-за несовершенства технологии плавки) смог выдать десятки тысяч тонн металла. В 1962 году был пущен обжиговый цех, благодаря которому снизились потери меди при плавке. Годом позже на предприятии

запустили сернокислотный цех, а в 1972 году – суперфосфатный цех.

В 1970-х годах завод подвергся масштабной реконструкции, из-за чего в 1980-х стал крупнейшим в СССР производителем меди (до 130 тыс. т в год), серной кислоты (940 тыс. т в год) и суперфосфатных удобрений (1 млн т в год). В начальный период современной России завод в два раза сократил выпуск продукции, но со временем восстановил свои объемы. На данный момент это одно из ведущих предприятий страны по выплавке черновой меди, а также по производству удобрений и серной кислоты [1].

В настоящее время медные шлаки активно утилизируются предприятием. В первую очередь из них выделяется медно-цинковый концентрат, который снова пускается в металлургический передел, а по-

путно извлекаются благородные металлы [2]. По предварительным оценкам в шлакоотвалах СУМЗа лежат 5,4 т золота и 103,7 т серебра [3]. К сожалению, получаемый при дроблении пылевидный шлак использовать особо некуда, в основном его пытаются применить в строительстве и поэтому объемы такого шлака нарастают. Ранее отмечалось, что к 2012 году на предприятии уже было накоплено около 10 млн т такого «технического песка» [4]. При этом с точки зрения экологии пылевидный шлак является более проблемным в сравнении с массивными камнеподобными (литыми) шлаками, так как мелкие частицы легко переносятся воздушными массами и активно вступают в реакцию с окружающей средой. На данном этапе основную часть «технического песка» складируют в выработки, то есть засыпают все карьеры, которые находятся вблизи предприятия. Кроме того, проводятся опыты с использованием данного песка в качестве подкормки для растений [5].

Вещественный состав медеплавильных шлаков СУМЗа достаточно активно изучался в последнее время, в том числе и нами. Первые сведения по минеральному составу данных шлаков были приведены в 2002 году [6]. Этими исследователями были установлены фаялит (80 об.%), магнетит (10 об.%), стекло, медь и сульфиды (борнит, ковеллин). В 2007 году вышла монография А.Б. Макарова [7], где, среди прочего, упоминался минеральный состав шлаков СУМЗа: кварц – 24%, магнетит – 21%, фаялит – 20%, пирротин – 12%, виллемит – 10%, феррит цинка – 10%, куприт – 1%, шпинель – 1%, псевдоволластонит – 1%. В 2013 году вышла коллективная монография по техногенным образованиям Урала [3] и там тоже упоминался минеральный состав шлаков Среднеуральского завода. Были приведены следующие минералы: фаялит, магнетит, феррит цинка, куприт, тенорит, деляфоссит и сульфиды меди и железа, а также волластонит и медь.

Нами в шлаках описывался фаялит из центральных частей шлакоблоков [8], магнетитовые настыли [9] и необычный кварц-купритовый шлак [10]. Были выделены следующие минералы: фаялит, магнетит, пироксен (диопсид, авгит), медь, кварц, куприт, сульфиды Cu-Fe-Zn, силикат Ni-Mg, фазы Cu-Cr, Cu-Fe, Cu-Sn-Fe и стекла (в каждом случае разного состава). При этом нами рассматривались отдельные интересные минералогические сюжеты, и детального изучения шлаков Среднеуральского медеплавильного завода не проводилось.

Для сравнения необходимо привести литературные данные по пылевидным шлакам, которые получились при дроблении литых шлаков и вроде как должны быть идентичны с ними по составу. По сведениям самого предприятия минеральный состав пылевидного шлака следующий: фаялит – 49%, кварц – 20%, магнетит – 10%, феррит цинка – 8%, пирротин – 1%, борнит – 0,5%, халькопирит – 0,4%, ковеллин – 0,05%, прочие – 11,05% [11]. При этом, по данным

преподавателей УГГУ, пылевидные шлаки состоят из фаялита, магнетита, сульфидов, хромшпинелида, кварца и апатита [12]. По сведениям сотрудников ИГГ УрО РАН, «технический песок» сложен фаялитом, магнетитом, пироксеном (ферросилит-энстит), реже авгит, пижонит и геденбергит), виоститом, гематитом, штейном (сульфидами – галенитом, пиритом и халькопиритом), шпейзой (интерметаллиды на основе сурьмы или мышьяка), стеклом и кварцем [13]. В то же время уже объединенный коллектив ученых из ИМин УрО РАН, ИГГ УрО РАН и ИМет УрО РАН привел немного другой минеральный состав песков, по их мнению, они состоят из фаялита, форстерита, магнетита, феррита цинка и меди, диопсида, цинкита и сфалерита [14].

Таким образом, мы вынуждены констатировать, что различные исследователи привели противоречивые данные по вещественному составу шлаков СУМЗа. Настоящая работа направлена на изучение и уточнение минерального состава медных шлаков Среднеуральского завода.

Отбор образцов шлака и методы исследования

Медные шлаки были отобраны нами в разное время в течение 2010-х годов. Образцы (всего отобрано около 50 шт.) отбирались в пределах заводских шлакоотвалов, расположенных на северной и западной окраинах предприятия. Исследовались крупнобломочный материал и огромные блоки шлаков размером до 1-2 м. Отобранные образцы шлаков (размер от первых сантиметров до 15-20 см) имеют черный цвет, часто с красноватой патиной. Пористость минимальная, обычно не более 1-2 об.%. В некоторых образцах встречается медь. Местами на шлаках отмечается развитие вторичной минерализации: медная зелень или синий халькантит (медный купорос). Несмотря на разнообразие образцов, их внешний вид достаточно однородный, различается только зернистость шлака.

Все аналитические исследования были проведены в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург). Химический состав шлака установлен на рентгено-флуоресцентном волновом спектрометре XRF 1800 фирмы Shimadzu (аналитик Л.А. Татаринова). Химический состав минералов и их фотографии сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Л.В. Леонова). Для изучения использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков шлака.

Полученные результаты

В результате исследований оказалось, что отобранные нами шлаки сложены оливин-пироксеновым агрегатом со значительным содержанием магнетита, хромшпинелидов и присутствием различных сульфидов, арсенидов и стибнидов, а также стекла, меди и

интерметаллида меди и золота. Химический состав шлака следующий (в мас.-%): SiO_2 – 32,18; TiO_2 – 0,27; Cr_2O_3 – 0,57; Al_2O_3 – 5,85; $\text{FeO}_{\text{общ}}$ – 48,07; MgO – 1,25; MnO – 0,08; CuO – 0,53; ZnO – 4,81; CaO – 4,15; K_2O – 0,71; Na_2O – 0,63; P_2O_5 – 0,17; SO_3 – 1,62; сумма – 100,89.

Фаялит ($\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$) является главным минералом в шлаке (около 45-50 об.%) и часто образует практически мономинеральные скопления. Оливин слагает игольчатые скелетные кристаллы (рис. 1, 2) размером от 20 мкм до первых сантиметров по удлинению. По данным химического состава (табл. 1) минерал относится к фаялиту и содержит примеси ZnO (до 3,1 мас.-%), MgO (до 2,7 мас.-%), CaO (до 1,4 мас.-%), CuO (до 0,6 мас.-%) и Al_2O_3 (до 0,5 мас.-%), то есть рассчитываются миналы форстерита (до 7%), виллемита (до 4%) и кальциооливина (до 2,5%). На петрографической диаграмме оливина анализы попадают в поля феррогортонолита и собственно фаялита. Интересно, что ранее описанный нами фаялит из центральных частей шлакоблоков содержит еще больше ZnO в пределах 3-4 мас.% [8].

Авгит (($\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe}$)₂[Si_2O_6]) является второстепенным минералом в шлаке (около 15-20 об.%) и встречается в интерстициях между кристаллами фаялита (см. рис. 1). Пироксен образует мелкие короткопризматические индивиды и их агрегаты размером не более 40 мкм. Полученные анализы пироксена попадают в поле авгита, недалеко от области развития геденбергита. Авгит содержит примеси Al_2O_3 (до 4,5 мас.-%), Cr_2O_3 (до 2,8 мас.-%), MgO (до 2,6 мас.-%) и ZnO (до 1,8 мас.-%) (см. табл. 1). Пироксен является

кальциоидифицитным и, по всей видимости, часть железа замещает вакансии в позиции кальция. Изученный авгит немного напоминает ранее описанный нами пироксен из магнетитовых настылей СУМЗа [9].

Магнетит ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$) является второстепенным минералом в шлаке (около 20 об.%) и образует изометричные округлые или хорошо окристаллизованные зерна (рис. 1), а также скелетные кристаллы (см. рис. 2). Кроме того, встречается в виде кайм мощностью до 20 мкм, вокруг зерен хромшпинелида (рис. 3). Размер индивидов магнетита достигает 0,5 мм. Химический состав зерен (табл. 2, анализы 1-2) достаточно однородный и отвечает глиноземистому магнетиту. Из значимых примесей в минерале отмечаются алюминий (Al_2O_3 до 5,5 мас.-%), цинк (ZnO до 2,7 мас.-%), титан (TiO_2 до 1,2 мас.-%), хром (Cr_2O_3 до 1,8 мас.-%) и кремний (SiO_2 до 1,0 мас.-%). Пересчет на кристаллохимические формулы показывает присутствие миналов герцинита (до 12%) и франклинита (до 8%). При этом магнетит из новообразованных кайм по зернам хромшпинелида резко отличается по химическому составу (табл. 2, анализы 3-4), в первую очередь повышенной хромистостью с содержанием до 20,2 мас.% Cr_2O_3 . Кроме того, в шпинелиде нарастает количество примесей алюминия (Al_2O_3 до 8,4 мас.-%) и цинка (ZnO до 4,3 мас.-%). Кристаллохимический пересчет показывает присутствие миналов хромита (до 30%), герцинита (до 18%) и франклинита (до 12%), то есть на долю самого магнетита приходится около 40%. Похожие значения и у ранее описанного нами магнетита из центральных частей шлакоблоков [8].

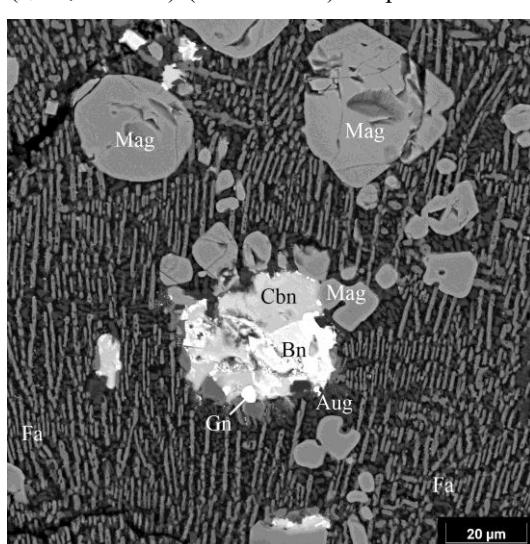


Рис. 1. Внешний вид медного шлака: Fa – фаялит; Aug – авгит; Mag – магнетит; Gn – галенит; Cbn – кубанит; Bn – борнит. Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 1. Appearance of copper slag: Fa as fayalite; Aug as augite; Mag as magnetite; Gn as galena; Cbn as cubanite; Bn as bornite. BSE-photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

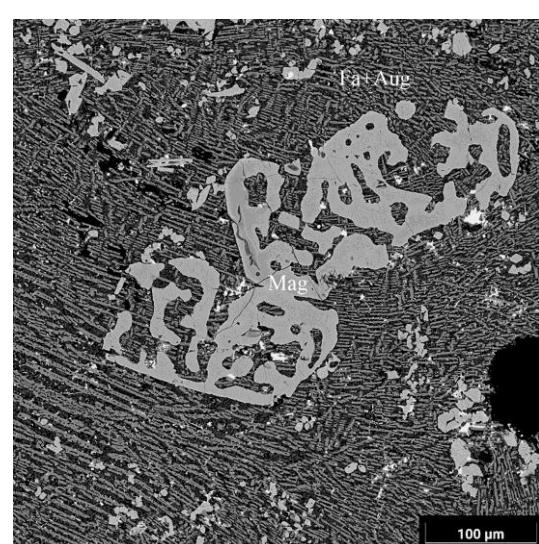


Рис. 2. Скелетные кристаллы магнетита в матрице шлака: Mag – Магнетит; Fa+Aug – агрегат фаялита с авгитом. Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 2. Skeletal crystals of magnetite in a slag matrix: Mag as magnetite; Fa+Aug as aggregate of fayalite with augite. BSE-photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Таблица 1. Химический состав фаялита и авгита, мас. %
Table 1. Chemical composition of fayalite and augite, wt. %

Номер анализа	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	CuO	ZnO	MgO	CaO	Сумма
Фаялит									
1	29,89	-	-	66,59	-	1,37	1,37	0,78	100
2	29,49	-	0,48	64,17	0,30	2,16	2,19	1,21	100
3	29,86	-	0,30	62,78	0,36	2,65	2,61	1,44	100
4	29,44	-	0,49	62,96	0,60	3,08	2,74	0,69	100
Авгит									
5	43,43	2,79	4,50	28,69	-	1,05	1,90	17,64	100
6	43,55	2,45	4,40	28,13	-	1,30	1,79	18,38	100
7	44,53	2,14	3,45	28,19	-	1,58	1,95	18,16	100
8	45,94	1,37	3,15	26,98	-	1,82	2,62	18,12	100
Кристаллохимические формулы в пересчете на количество атомов кислорода									
1	$(Fe_{1.87}Mg_{0.07}Zn_{0.03}Ca_{0.03})_{2.00}[Si_{1.00}O_4]$								
2	$(Fe_{1.79}Mg_{0.11}Zn_{0.05}Ca_{0.04}Cu_{0.01})_{2.00}[Si_{0.98}Al_{0.02})_{1.00}O_4]$								
3	$(Fe_{1.74}Mg_{0.13}Zn_{0.07}Ca_{0.05}Cu_{0.01})_{2.00}[Si_{0.99}Al_{0.01})_{1.00}O_4]$								
4	$(Fe_{1.75}Mg_{0.14}Zn_{0.08}Ca_{0.02}Cu_{0.01})_{2.00}[Si_{0.98}Al_{0.02})_{1.00}O_4]$								
5	$(Ca_{0.78}Fe_{0.22})_{1.00}(Fe_{0.76}Mg_{0.12}Cr_{0.09}Zn_{0.03})_{1.00}[Si_{1.78}Al_{0.22})_{2.00}O_6]$								
6	$(Ca_{0.81}Fe_{0.19})_{1.00}(Fe_{0.77}Mg_{0.11}Cr_{0.08}Zn_{0.04})_{1.00}[Si_{1.79}Al_{0.21})_{2.00}O_6]$								
7	$(Ca_{0.80}Fe_{0.20})_{1.00}(Fe_{0.76}Mg_{0.12}Cr_{0.07}Zn_{0.05})_{1.00}[Si_{1.83}Al_{0.17})_{2.00}O_6]$								
8	$(Ca_{0.79}Fe_{0.21})_{1.00}(Fe_{0.75}Mg_{0.16}Zn_{0.06}Cr_{0.04})_{1.01}[Si_{1.84}Al_{0.15})_{1.99}O_6]$								

Таблица 2. Химический состав шпинелидов, мас. %
Table 2. Chemical composition of spinelides, wt. %

Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	ZnO	MgO	CaO	Сумма
Магнетит										
1	0,78	1,30	5,49	-	60,37	28,86	2,74	-	0,19	99,73
2	0,98	1,18	5,29	1,11	59,33	29,24	2,73	-	-	99,86
3	0,63	0,25	8,42	10,85	47,03	28,69	2,78	1,19	-	99,84
4	0,44	1,19	6,24	20,22	39,40	27,25	4,32	0,74	0,28	100,08
Хромит										
5	1,43	0,41	6,03	47,24	13,25	23,71	6,08	2,08	0,20	100,43
6	1,21	-	7,21	57,54	4,57	18,68	5,08	6,28	-	100,57
Магнезиохромит										
7	0,55	-	7,73	63,15	1,86	11,57	3,31	12,12	-	100,29
8	0,48	-	8,15	66,14	1,75	2,82	-	20,94	-	99,28
Кристаллохимические формулы в пересчете на 4 атома кислорода										
1	$(Fe_{0.91}Zn_{0.08}Ca_{0.01})_{1.00}(Fe_{1.69}Al_{0.24}Ti_{0.04}Si_{0.03})_{2.00}O_4$									
2	$(Fe_{0.92}Zn_{0.08})_{1.00}(Fe_{1.67}Al_{0.23}Si_{0.04}Cr_{0.03})_{2.00}O_4$									
3	$(Fe_{0.87}Zn_{0.08}Mg_{0.06})_{1.01}(Fe_{1.29}Al_{0.36}Cr_{0.31}Si_{0.02}Ti_{0.01})_{1.99}O_4$									
4	$(Fe_{0.84}Zn_{0.12}Mg_{0.04}Ca_{0.01})_{1.01}(Fe_{1.08}Cr_{0.59}Al_{0.27}Ti_{0.03}Si_{0.02})_{1.99}O_4$									
5	$(Fe_{0.71}Zn_{0.16}Mg_{0.11}Ca_{0.01})_{0.99}(Cr_{1.33}Fe_{0.36}Al_{0.26}Si_{0.05}Ti_{0.01})_{2.01}O_4$									
6	$(Fe_{0.54}Mg_{0.32}Zn_{0.13})_{0.99}(Cr_{1.56}Al_{0.29}Fe_{0.12}Si_{0.04})_{2.01}O_4$									
7	$(Mg_{0.60}Fe_{0.32}Zn_{0.08})_{0.99}(Cr_{1.63}Al_{0.30}Fe_{0.05}Si_{0.02})_{2.00}O_4$									
8	$(Mg_{0.93}Fe_{0.07})_{0.99}(Cr_{1.64}Al_{0.30}Fe_{0.04}Si_{0.02})_{2.00}O_4$									

Хромит ($Fe^{2+}Cr_2O_4$) в шлаке встречается редко, он образует промежуточные зоны в зернах хромшпинелида между каймами хромистого магнетита и основной матрицей магнезиохромита (см. рис. 3). Мощность зоны составляет от 20 до 30 мкм. Химический состав хромита изменчивый (см. табл. 2, анализы 5-6). Он становится более хромистым и магнезиальным при приближении к магнезиохромиту (анализ 6) и более железистым и цинклистым – к кайме магнетита (анализ 5). Из примесей в хромите отмечаются алюминий (Al_2O_3 до 7,2 мас.-%), магний (MgO до 6,3

мас.-%), цинк (ZnO до 6,1 мас.-%), кремний (SiO_2 до 1,4 мас.-%) и титан (TiO_2 до 0,4 мас.-%).

Магнезиохромит ($MgCr_2O_4$) слагает центральную часть зерен хромшпинелида (см. рис. 3), которые достигают относительно крупных размеров – до 1 мм в диаметре. Химический состав магнезиохромита, как и у хромита, тоже изменчивый (см. табл. 2, анализы 7-8). В центральной части зерен хромшпинелид более магнезиальный и не содержит цинк (анализ 8), а при приближении к зоне хромита в минерале появляется цинк и резко нарастает железо (анализ 7). Из приме-

сей в магнезиохромите отмечаются железо (FeO до 11,6 мас.%), алюминий (Al_2O_3 до 8,2 мас.%), цинк (ZnO до 3,3 мас.%) и кремний (SiO_2 до 0,6 мас.%).

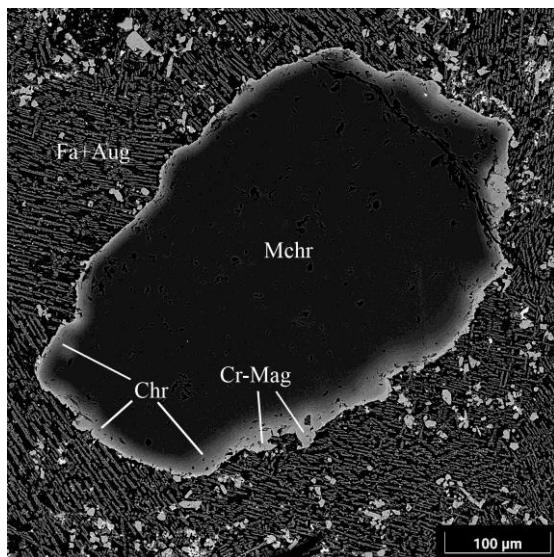


Рис. 3. Хромшпинелид в матрице шлака:
 Chr – хромит; Mchr – магнезиохромит;
 Cr-Mag – Cr-магнетит; Fa+Aug – агрегат
 фаялита с авгитом. Фото в BSE-режиме,
 СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 3. Chromespinelide in the slag matrix:
 Chr as Chromite; Mchr as magnesiochromite;
 Cr-Mag as Cr-magnetite; Fa+Aug as fayalite
 aggregate with augite. BSE-photo,
 SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

Стекло в шлаке встречается редко, его количество не превышает 5 об.%. Оно выполняет интерстиции между кристаллами фаялита и индивидами пироксена. Размер его выделений не превышает 10 мкм. Представительный состав этого стекла следующий (в мас. %): SiO_2 – 42,51; Al_2O_3 – 6,73; FeO – 33,59; ZnO – 1,36; BaO – 1,42; MgO – 1,79; CaO – 10,45; Na_2O – 1,18; K_2O – 0,96. На диаграмме TAS этот анализ попадает в поле умеренно-щелочных пикробазальтов, то есть относится к субщелочным ультраосновным породам. Вокруг редких обломков кварца тоже отмечается стекло, которое облекает кремнезем в виде слоев мощностью до 100 мкм. Представительный состав этого стекла следующий (в мас. %): SiO_2 – 59,49; Al_2O_3 – 11,65; FeO – 15,97; ZnO – 1,06; BaO – 1,30; MgO – 0,77; CaO – 3,19; Na_2O – 2,91; K_2O – 3,66. На диаграмме TAS этот анализ попадает в поле трахиандезитов, то есть относится к субщелочным средним породам.

Сульфиды Cu-Fe являются главными минералами серы в шлаке и встречаются по всей матрице породы в виде округлых выделений размером до 1-2 мм в диаметре. Они часто содержат обильные включения магнетита и разнообразных халькогенидов. Судя по полученным составам, преобладают две фазы суль-

фидов (в мас. %): S – 25-27; Fe – 13-18; Cu – 57-61 и S – 33-35; Fe – 38-41; Cu – 22-25. Первый сульфид достаточно близок к *борниту* (Cu_5FeS_4 – S – 25,6; Fe – 11,1; Cu – 63,3), а второй хорошо коррелируется с *кубанитом* ($CuFe_2S_3$ – S – 35,4; Fe – 41,2; Cu – 23,4). Интересно, что местами в мелких сульфидных шариках вместо борнита образуется фаза (S – 30,7; Fe – 17,1; Cu – 52,2), близкая по составу к *идаиту* – Cu_3FeS_4 (S – 34,2; Fe – 14,9; Cu – 50,9). Похожий сульфид описывался нами ранее в образцах из центральных частей шлакоблоков [8].

Сульфиды Zn-Fe в шлаке встречаются редко и обычно наблюдаются отдельно от шариков борнит-кубанитового состава. *Сфалерит* образует ксеноморфные выделения среди оливин-пироксенового агрегата, размером до 50 мкм. По составу сульфид однородный (в мас. %): S – 34,07; Fe – 24,55; Zn – 39,61; Cu – 1,77, что в пересчете дает следующую кристаллохимическую формулу: $(Zn_{0,57}Fe_{0,41}Cu_{0,03})_{1,01}S_{0,99}$, то есть является сильно-железистой разновидностью сфалерита – марматитом. Другой сульфид Zn-Fe слагает однофазные шарики размером до 500 мкм. По составу он тоже однородный (в мас. %): S – 35,29; Fe – 37,57; Zn – 15,27; Cu – 11,87, и, по всей видимости, является цинковым аналогом кубанита с формулой $(Zn_{0,64}Cu_{0,51})_{1,15}Fe_{1,84}S_{3,01}$.

Галенит (PbS) образует отдельные включения в сульфидных шариках (см. **рис. 1**), а также каплевидную, ориентированную (эвтектическую) вкрапленность на границе сульфидов и силикатной матрицы шлака (**рис. 4**). Размер зерен галенита не более 20 мкм. Отдельные зерна галенита по составу достаточно чистые, из примесей отмечается только медь (до 3,0 мас.%) и железо (до 2,5 мас.%). Ориентированная вкрапленность галенита содержит больше примесей, в ней установлены Cu (до 4,4 мас.%), Fe (до 1,2 мас.%), Te (до 0,9 мас.%) и Ni (до 0,6 мас.%). Это объясняется тем, что именно с таким каплевидным галенитом встречаются скопления арсенидов и стибидов (так называемая шпейза).

Брейтгауптит (NiSb) является главным минералом в арсенидно-стибидидных скоплениях. Он образует вытянутые и неправильной формы зерна размером до 50 мкм (см. **рис. 4**). По химическому составу зерна однородные и уверенно определяются как брейтгауптит (**табл. 3**, анализы 1-2). В качестве примесей в стибидиде никеля отмечается As (до 4,9 мас.%), Fe (до 2,2 мас.%), Cu (до 2,3 мас.%) и Co (до 1,8 мас.%).

Вестервельдит (FeAs), так же как и брейтгауптит, является главным минералом в арсенидно-стибидидных скоплениях. Он образует удлиненные зерна размером до 30 мкм и часто контактирует с брейтгауптитом (см. **рис. 4**). По химическому составу зерна однородные и уверенно определяются как вестервельдит (см. **табл. 3**, анализы 3-4). Из примесей в арсениде железа отмечается Ni (до 6,7 мас.%), Co (до 6,0 мас.%), Sb (до 2,0 мас.%) и Cu (до 1,0 мас.%).

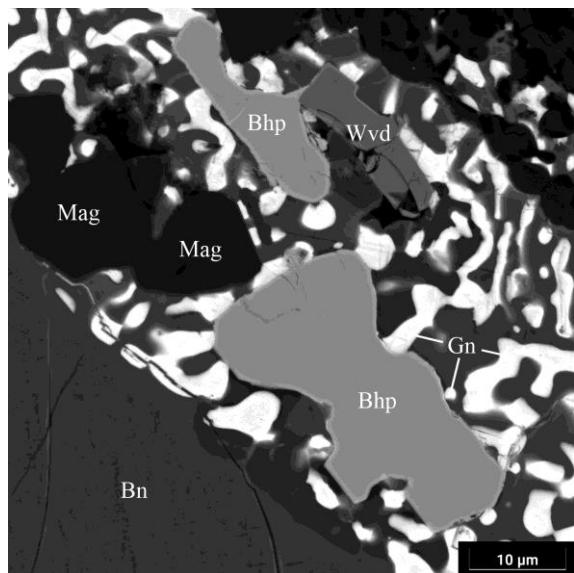


Рис. 4. Арсенидно-стибнайдная минерализация:
Bhp – Брейтгауптит; Bn – борнит;
Gn – галенит; Wvd – вестервельдит;
Mag – магнетит. Фото в BSE-режиме,
СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 4. Arsenide-stibnite mineralization:
Bhp as Breithauptite; Bn as bornite; Gn as galena;
Wvd as westerveldite; Mag as magnetite.
BSE-photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

Таблица 3. Химический состав стибнайдов и арсенидов, мас. %
Table 3. Chemical composition of stibnides and arsenides, wt. %

Номер анализа	Fe	Co	Ni	Cu	As	Sb	Ag	Au	Сумма
Брейтгауптит									
1	2,24	1,76	27,36	2,13	4,68	61,83	-	-	100
2	2,18	1,70	27,75	2,25	4,87	61,25	-	-	100
Вестервельдит									
3	29,56	5,45	6,72	0,91	55,40	1,96	-	-	100
4	29,22	6,03	6,53	1,03	55,59	1,60	-	-	100
Купростибит									
5	5,13	-	0,49	45,68	5,90	41,33	1,47	-	100
6	5,58	0,14	0,52	43,91	6,14	41,88	1,26	-	100
Алларгентум									
7	2,11	-	0,17	1,64	0,78	15,35	77,79	2,16	100
8	2,23	-	0,23	1,53	0,81	15,29	75,99	3,92	100
Кристаллохимические формулы в пересчете на количество атомов									
1	$(\text{Ni}_{0,82}\text{Fe}_{0,07}\text{Cu}_{0,06}\text{Co}_{0,05})_{1,00}(\text{Sb}_{0,89}\text{As}_{0,11})_{1,00}$								
2	$(\text{Ni}_{0,83}\text{Fe}_{0,07}\text{Cu}_{0,06}\text{Co}_{0,05})_{1,01}(\text{Sb}_{0,88}\text{As}_{0,11})_{0,99}$								
3	$(\text{Fe}_{0,71}\text{Ni}_{0,15}\text{Co}_{0,12}\text{Cu}_{0,02})_{1,00}(\text{As}_{0,98}\text{Sb}_{0,02})_{1,00}$								
4	$(\text{Fe}_{0,69}\text{Ni}_{0,15}\text{Co}_{0,14}\text{Cu}_{0,02})_{1,00}(\text{As}_{0,98}\text{Sb}_{0,02})_{1,00}$								
5	$(\text{Cu}_{1,75}\text{Fe}_{0,22}\text{Ag}_{0,03}\text{Ni}_{0,02})_{2,00}(\text{Sb}_{0,81}\text{As}_{0,19})_{1,00}$								
6	$(\text{Cu}_{1,70}\text{Fe}_{0,24}\text{Ag}_{0,03}\text{Ni}_{0,02}\text{Co}_{0,01})_{2,00}(\text{Sb}_{0,80}\text{As}_{0,20})_{1,00}$								
7	$(\text{Ag}_{5,41}\text{Fe}_{0,28}\text{Cu}_{0,19}\text{Au}_{0,08}\text{Ni}_{0,02})_{5,98}(\text{Sb}_{0,94}\text{As}_{0,08})_{1,02}$								
8	$(\text{Ag}_{5,31}\text{Fe}_{0,30}\text{Cu}_{0,18}\text{Au}_{0,15}\text{Ni}_{0,03})_{5,97}(\text{Sb}_{0,95}\text{As}_{0,08})_{1,03}$								

Купростибит (Cu_2Sb) встречается редко в зоне каплевидного галенита и отдельно от брейтгауптита и вестервельдита, образуя единичные изометрические зерна размером до 10 мкм. Обычно наблюдается на границе галенита и борнита. По химическому составу минерал определяется как купростибит (см. табл. 3, анализы 5-6). В качестве примесей в стибниде меди отмечаются As (до 6,1 мас.-%), Fe (до 5,6 мас.-%), Ag (до 1,5 мас.-%), Ni (до 0,5 мас.-%) и Co (до 0,1 мас.-%).

Алларгентум (Ag_6Sb) образует тонкие прожилки мощностью до 1 мкм в брейтгауптите и мелкие изометрические зерна размером до 5 мкм, вокруг стибнита никеля (см. рис. 4). По своему составу минерал (см. табл. 3, анализы 7-8) близок к алларгентуму Ag_6Sb (Sb – 15,8%; Ag – 84,2%) [15]. В качестве примесей в стибниде серебра отмечаются Au (до 3,9 мас.-%), Fe (до 2,2 мас.-%), Cu (до 1,6 мас.-%), As (до 0,8 мас.-%) и Ni (до 0,2 мас.-%).

Аурикуприд (Cu_3Au) образует мелкие зерна размером до 5 мкм в срастании с брейтгауптитом. По составу минерал (Cu 47,9%; Au 52,1%) хорошо соответствует аурикуприду Cu_3Au (Cu 49,2%; Au 50,8%) [16]. Каких-либо примесей в интерметаллиде не отмечается.

Медь (Cu) образует мелкие шарики размером до 50 мкм по всей матрице шлака. Металл часто характеризуется включениями магнетита. По составу медь отличается чистотой и содержит небольшую примесь Fe (до 0,9 мас.-%).

Обсуждение полученных результатов

В результате проведенного нами исследования минеральный состав черных шлаков Среднеуральского медеплавильного завода выглядит следующим образом. Силикатная матрица породы сложена фаялитом и железистым авгитом с присутствием стекла. Окислы представлены магнетитом (в большом количестве), хромитом и магнезиохромитом. Из сульфидов установлены кубанит и борнит (главные фазы), реже идаит, сфалерит, галенит и Zn-аналог кубанита. Арсенидно-стибнидная минерализация образована ассоциацией брейтгауптита, вестервельдита, купростибита и алларгентума. Металлы и интерметаллиды представлены медью и аурикуприодом. Кварц присутствует только как обломочный и реликтовый минерал, то есть он не относится к ассоциации медного шлака.

Выявленная минерализация достаточно сильно отличается от ранее приведенной минералогии литых и пылевидных шлаков Среднеуральского завода (см. введение). Нашиими данными убедительно доказывается, что никаких находок виллемита, цинкита и феррита цинка в шлаках СУМЗа быть не может, так как весь цинк входит в виде изоморфного компонента в фаялит, стекло и шпинелиды (главным образом, в магнетит) и, следовательно, самостоятельных фаз цинк не образует, за исключением сульфидов. Находки гематита и вюстита также выглядят очень сомнительными, так как в шлаке надежно фиксируется магнетит. Предельно окисленное железо (гематит) и за-кисное (вюстит) совместно с полуокисленным железом (магнетитом) встречаются в одной системе не могут. В принципе гематит, как вторичный минерал, может заместить первичный магнетит, но к парагенезису шлака он в этом случае не имеет отношения. К этому же относятся упоминания об тенорите и делофоссите. Это гипергенные минералы меди и образуются они путем замещения первичного субстрата.

Отдельно можно отметить вопрос пироксенов и пироксеноидов. Ранее выделяемые волластонит и псевдоволластонит в медных шлаках не встречаются, они, а точнее именно высокотемпературный псевдоволластонит, характерны для шлаков производства чугуна и железа. Упоминаемые пироксены типа ферросилит-энститит типичны для метеоритов и в шлаках достоверно пока не отмечались. Пижонит и геденбергит в присутствии авгита кристаллизоваться не могут, так как эти пироксены близки по составу и им для образования требуются одни и те же вещества.

Сульфидная минерализация предыдущими исследователями выделялась достаточно обширной, поэтому неудивительно, что какая-то их часть минералов совпала с выделенными нами фазами. При этом такие сульфиды, как пирит и пирротин, вообще не встречаются в медных шлаках, вместо них обычно кристаллизуется троилит, а халькопирит и ковеллин отмечаются крайне редко. Причем последний суль-

фид может образоваться как гипергенный минерал по первичным халькогенидам.

Почему в медных шлаках СУМЗа получилась такая «разнообразная» минералогия? К сожалению, их изучение началось в домикрозондовую эпоху исследования вещества, а выделение минералов ранее проводилось на основании минералогического и рентгенофазового анализов. Первый метод заключается в определении минералов по внешнему виду и является крайне сомнительным, так как в этом случае всё зависит от квалификации минералога. К тому же внешний вид минералов очень изменчив и визуальное определение нуждается в дополнительных инструментальных исследованиях. Рентгенофазовый метод хорошо работает при определении одного или нескольких минералов. В случае со шлаками СУМЗа мы имеем практически двадцать минеральных фаз, рентгеновские отражения которых будут накладываться друг на друга, и интерпретировать их крайне затруднительно, поэтому в случае использования этого метода достоверно определяются только главные минералы.

Медные шлаки Среднеуральского завода подлежат активной переработке. Большое количество сульфидов и арсенидов-стибнидов, а также связанных с ними благородных металлов можно выделять с помощью флотации. Собственно говоря, предприятие именно этим и занимается, в итоге получая не только сульфидный концентрат с золотом и серебром, но и пылевидный шлак. К сожалению, извлечение сульфидного концентрата составляет не более 60% [6], то есть около 40% халькогенидов и благородных металлов уходит в пылевидный шлак.

По нашим представлениям, пылевидный шлак можно дополнительно подвергать магнитной сепарации, что позволит добывать магнетитовый концентрат, который к тому же дополнительно содержит 3-4% ZnO. При этом объем шлакоотвала уменьшится на 20 об.% (примерно столько минерала содержится в породе). Магнетит в нашей стране является рудой на железо, его можно будет перепродавать на заводы черной металлургии или химической промышленности. Возможно, СУМЗ уже занимается этим, так как это вполне очевидный вывод, но нам не удалось получить эту информацию. Переработку оставшегося пылевидного шлака можно отложить до будущих времен, когда добыча железа из силикатов станет рентабельной, а пока их можно считать потенциальной железной рудой.

Заключение

Таким образом, нами рассмотрена и дополнена минералогия литых шлаков Среднеуральского медеплавильного завода. Установлено, что они сложены фаялитом и железистым авгитом с присутствием магнетита, стекла и хромшпинелида (хромита и магнезиохромита). Сульфидная составляющая в основном представлена кубанитом и борнитом, реже идаитом,

сфалеритом, галенитом и Zn-аналогом кубанита. Кроме того, отмечается арсенидно-стибнитная минерализация, сложенная брейтгауптитом, вестервельдитом, купростибитом и алларгентумом. Металлы и интерметаллиды представлены медью и аурикупридом. Литые шлаки СУМЗа активно перерабатываются с выделением сульфидного концентрата и благородных металлов и получением пылевидного черного песка. Из последнего можно попутно выделять магнетитовый концентрат, что позволит уменьшить объем шлаков почти на 20%.

Список источников

1. Металлургические заводы Урала XVII – XX вв. Энциклопедия / под ред. В.В. Алексеева. Екатеринбург: Академкнига, 2001. 536 с.
2. Макаров А.Б. Техногенные месторождения минерального сырья // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 8. С. 76–80.
3. Техногенное минеральное сырье Урала: монография / Перепелицын В.А., Рытвин В.М., Коротеев В.А., Макаров А.Б., Григорьев В.Г., Гильварг С.И., Абызов В.А., Абызов А.Н., Табулович Ф.А. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 332 с.
4. Макаров А.Б., Талалай А.Г. Техногенно-минеральные месторождения и их экологическая роль // Литосфера. 2012. № 1. С. 172–176.
5. Оценка мобильности элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в лесные почвы / Золотова Е.С., Рябинин В.Ф., Котельникова А.Л., Иванова Н.С. // Литосфера, 2020. Т. 20. № 5. С. 717–726. DOI:10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726
6. Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействия на окружающую среду: монография / Мормиль С.И., Сальников В.Л., Амосов Л.А., Хасанова Г.Г., Семячков А.И., Зобнин Б.Б., Бурмистренко А.В. Екатеринбург: ДПР по Уральскому региону, 2002. 206 с.
7. Макаров А.Б. Главные типы техногенно-минеральных месторождений Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. 206 с.
8. Ерохин Ю.В., Козлов П.С. Фаялит из шлаков Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда) // Минералогия техногенеза – 2010: сборник докладов XI научного семинара / отв. ред. С.С. Потапов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2010. С. 32–40.
9. Ерохин Ю.В., Козлов П.С. Магнетитовый шлак из Среднеуральского медеплавильного завода // Минералогия техногенеза – 2013: сборник докладов XIV научного семинара / отв. ред. С.С. Потапов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2013. С. 29–37.
10. Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Хиллер В.В. Купритовый шлак из Среднеуральского медеплавильного завода // Минералогия техногенеза – 2011: сборник докладов XII научного семинара / отв. ред. С.С. Потапов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. С. 26–38.
11. Использование отходов переработки отвальных шлаков для рекультивации земель горнодобывающего комплекса / Гуман О.М., Долинина И.А., Макаров А.Б., Рудой А.Г. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2010. № 4. С. 43–49.
12. Макаров А.Б., Гуман О.М., Долинина И.А. Минеральный состав отходов переработки отвальных шлаков Среднеуральского медеплавильного завода и оценка их потенциальной экологической опасности // Вестник Уральского отделения РМО. 2010. № 7. С. 80–86.
13. Котельникова А.Л., Рябинин В.Ф. Особенности вещественного состава и перспективы использования отходов вторичной переработки отвальных медеплавильных шлаков // Литосфера. 2018. Т. 18. № 1. С. 133–139.
14. Медеплавильные шлаки и вопросы утилизации минеральных отходов / Кориневская Г.Г., Муфтахов В.А., Котельникова А.Л., Халезов Б.Д., Реутов Д.С. // Минералогия техногенеза – 2014: сборник докладов XV научного семинара / отв. ред. С.С. Потапов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2014. С. 244–250.
15. Cipriani C., Corazza M., Mazzetti G. Reinvestigation of natural silver antimonides // European Journal of Mineralogy. 1996, vol. 8, pp. 1347–1350.
16. Новые данные по кристаллохимии и свойствам природных интерметаллических соединений системы Cu – Au / Новгородова М.И., Цепин А.И., Горшков А.И., Кудревич И.М., Вяльсов Л.Н. // Записки ВМО. 1977. Ч. 106. Вып. 5. С. 540–552.

References

1. Alekseev V.V. *Metallurgicheskiye zavody Urala XVII – XX vv. Entsiklopediya*. [Metallurgical plants of the Urals XVII – XX centuries. Encyclopedia]. Yekaterinburg: Academic Book Publishing House, 2001, 536 p. (In. Russ.)
2. Makarov A.B. Technogenic deposits of mineral raw materials. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal* [Soros educational journal], 2000;6(8):76-80. (In. Russ.)
3. Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Koroteev V.A., Makarov A.B., Grigoriev V.G., Gilvarg S.I., Abyzov V.A., Abyzov A.N., Tabulovich F.A. *Tekhnogennoye mineralnoye syr'ye Urala* [Technogenic mineral raw materials of the Urals]. Yekaterinburg: RIO UB RAS, 2013, 332 p. (In. Russ.)
4. Makarov A.B., Talalay A.G. Technogenic mineral deposits and their ecological role. *Litosfera* [Lithosphere], 2012;12(1):172-176. (In. Russ.)
5. Zolotova E.S., Ryabinin V.F., Kotelnikova A.L., Ivanova N.S. Assessment of the mobility of elements from copper smelter slag processing waste into forest soils. *Litosfera* [Lithosphere], 2020;20(5):717-726. (In. Russ.)
6. Mormil S.I., Salnikov V.L., Amosov L.A., Khasanova G.G., Semyachkov A.I., Zobnin B.B., Burmistroenko A.V. *Tekhnogennyye mestorozhdeniya Srednego Urala i otseinka ikh vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu* [Technogenic deposits of the Middle Urals and assessment of their impact on the environment]. Yekaterinburg: DPR for the Ural region, 2002, 206 p. (In. Russ.)
7. Makarov A.B. *Glavnyye tipy tekhnogenno-mineralnykh mestorozhdeniy Urala* [Main types of technogenic mineral deposits of the Urals]. Yekaterinburg: Publishing house of UGMU, 2006, 206 p. (In. Russ.)
8. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. Fayalite from slags of the Sredneuralsky copper-smelting plant (Revda). *Mineralogiya tekhnogeneza – 2010* [Mineralogy of Technogenesis – 2010]. Миасс: ИМин УроБР РАС, 2010, pp. 32-40. (In. Russ.)
9. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. *Magnetitovyy shlak iz Sredneuralskogo medeplavil'nogo zavoda* [Magnetite slag from the Sredneuralsk copper smelter]. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2013* [Mineralogy of technogenesis – 2013]. Миасс: ИМин УроБР РАС, 2013, pp. 29-37. (In. Russ.)

10. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S., Khiller V.V. *Kupritovyy shlak iz Sredneuralskogo medeplavilnogo zavoda* [Cuprite slag from the Sredneuralsk copper smelter]. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2011* [Mineralogy of technogenesis – 2011]. Miass: IMin UrBr RAS, 2011, pp. 26-38. (In. Russ.)
11. Guman O.M., Dolinina I.A., Makarov A.B., Rudoy A.G. Use of waste from processing of dump slags for reclamation of lands of the mining complex. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal], 2010;(4):43-49. (In. Russ.)
12. Makarov A.B., Guman O.M., Dolinina I.A. Mineral composition of waste from processing of waste slags of the Sredneuralsk copper smelter and assessment of their potential environmental hazard. *Vestnik Uralskogo otdeleniya RMO* [Bulletin of the Ural Branch of the RMS], 2010;(7):80-86. (In. Russ.)
13. Kotelnikova A.L., Ryabinin V.F. Features of the material composition and prospects for the use of waste from secondary processing of copper smelting slags. *Litosfera* [Lithosphere], 2018;18(1):133-139. (In. Russ.)
14. Korinevskaya G.G., Muftakhov V.A., Kotelnikova A.L., Khalezov B.D., Reutov D.S. Copper smelting slags and issues of mineral waste utilization. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2014* [Mineralogy of technogenesis – 2014]. Miass: IMin UrBr RAS, 2014, pp. 244-250. (In. Russ.)
15. Cipriani C., Corazza M., Mazzetti G. Reinvestigation of natural silver antimonides. *Europ. Jour. Miner.* 1996;8:1347-1350.
16. Novgorodova M.I., Tsepina A.I., Gorshkov A.I., Kudrevich I.M., Vyalsov L.N. New data on crystal chemistry and properties of natural intermetallic compounds of the Cu – Au system. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the All-Union Mineralogical Society], 1977;106(5):540-552. (In. Russ.)

Поступила 01.10.2024; принята к публикации 24.10.2024; опубликована 30.06.2025
Submitted 01/10/2024; revised 24/10/2024; published 30/06/2025

Ерохин Юрий Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: erokhin-yu@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0577-5898

Козлов Павел Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: geoeco2012@yandex.ru

Захаров Анатолий Владимирович – научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8790-7892

Ширяев Павел Борисович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: pavel.shiryayev@gmail.com. ORCID 0000-0002-3090-6001

Леонова Любовь Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: lvleonova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7713-8994

Yury V. Erokhin – PhD (Eng.), Leading Research Worker, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0577-5898

Pavel S. Kozlov – DrSc (Eng.), Leading Research Worker, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: geoeco2012@yandex.ru.

Anatoly V. Zakharov – Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8790-7892

Pavel B. Shiryayev – PhD (Eng.), Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: pavel.shiryayev@gmail.com. ORCID 0000-0002-3090-6001

Lyubov V. Leonova – PhD (Eng.), Senior Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: lvleonova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7713-8994