

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

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

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-56-66



ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ МЕДНЫХ ШЛАКОВ ПОЛЕВСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Ерохин Ю.В.¹, Макаров А.Б.², Захаров А.В.¹, Хиллер В.В.¹, Леонова Л.В.¹¹Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Уральский регион около 300 лет является металлургическим центром России и за столь продолжительный период здесь накопилось большое количество шлаков, в том числе и медных. Изучение их вещественного состава является актуальной задачей, так как прежде чем их утилизировать, надо оценить их минеральный состав. Многие шлаки представляют собой потенциальную руду, которую можно дополнительно переработать. Полевской металлургический завод (1724-1930) был крупным производителем черновой меди. От него сохранился небольшой медный шлакоотвал, возникший в последние годы работы предприятия, вещественный состав которого практически не изучен. На данный момент шлакоотвал активно загрязняет окружающую среду и его необходимо утилизировать. **Цель работы.** Изучение вещественного (минерального) состава медных шлаков Полевского металлургического завода. **Используемые методы.** Геохимический состав шлаков установлен на масс-спектрометре Agilent 7700X (ИОУ ФНЦ МиГ УрО РАН), а химический 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 (минерального) состава шлаков проводилось с применением современной номенклатуры Комиссии по новым минералам Международной минералогической ассоциации и использованием методов классической минералогии. **Результат.** Изучена минералогия медных шлаков Полевского металлургического завода, которые складированы в небольшом отвале у западного подножия горы Думной. Установлено, что шлаки представлены двумя типами, отличающимися друг от друга минералого-геохимическими характеристиками. Первый тип сложен фаялит-пижонитовым агрегатом с присутствием магнетита, стекла, форстерита, халькозина, купростибита, домейкита и меди. Второй тип представлен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, брейтгаупгита и сульфидов (идаита, кубанита, борнита, халькопирита, галенита). Первый тип шлака характеризуется «гипербазитовым» геохимическим трендом, а второй – «базитовым». Сделан вывод, что шлаки первого типа получились в результате переплавки «цементной меди», а шлаки второго типа образовались при переработке медноколчеданных руд Зюзельского месторождения. **Практическая значимость.** Изученные медные шлаки можно переработать, они друг от друга отличаются магнитными свойствами (второй тип шлака сильномагнитный и его можно легко отделить). Из первого типа шлака можно выделить медь (с попутным золотом), а также магнетитовый концентрат, содержащий титан, ванадий и хром. Из второго типа шлака с помощью флотации можно выделить сульфидный концентрат, содержащий не только медь, железо, цинк, но и свинец с никелем. Магнитной сепарацией можно выделить магнетитовый концентрат, который к тому же дополнительно содержит примеси титана и 5% ZnO.

Ключевые слова: фаялит, пижонит, магнетит, сульфиды, минералогия, шлаки, Полевской металлургический 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., Макаров А.Б., Захаров А.В., Хиллер В.В., Леонова Л.В., 2026

Для цитирования

Вещественный состав медных шлаков Полевского металлургического завода / Ерохин Ю.В., Макаров А.Б., Захаров А.В., Хиллер В.В., Леонова Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 56-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-56-66>



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

MATERIAL COMPOSITION OF COPPER SLAGS FROM THE POLEVSKOY METALLURGICAL PLANT

Erokhin Yu.V.¹, Makarov A.B.², Zakharov A.V.¹, Khiller V.V.¹, Leonova L.V.¹

¹Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia

²Urals State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The Ural region has been the metallurgical center of Russia for approximately 300 years, and over this long period, a large amount of slag, including copper, has accumulated there. Studying their material composition is a relevant issue, as their mineral composition must be assessed before disposal. Many slags are potential ore that can be further processed. The Polevskoy Metallurgical Plant (1724-1930) was a major producer of blister copper. A small copper slag dump remains, created in the final years of the plant's operation, and its material composition remains barely studied. Currently, the slag dump pollutes the environment and, therefore, there is a need for its disposal. **Objectives.** The research is aimed at studying the material (mineral) composition of copper slags of the Polevskoy Metallurgical Plant. **Methods Applied.** The geochemical composition of the slags has been determined using an Agilent 7700X mass spectrometer (South Ural Federal Scientific Center of Mining and Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), and the chemical composition of the minerals has been determined using a TESCAN MIRA LMS, S6123 scanning electron microscope with an INCA Energy 450 X-Max 80 energy-dispersive unit from Oxford Instruments (Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences). The latter device has also been used to take photographs of the minerals. **Originality.** The study of the material (mineral) composition of slags has been carried out using the modern nomenclature of the Commission on New Minerals of the International Mineralogical Association and using the methods of classical mineralogy. **Result.** The mineralogy of copper slags from the Polevskoy Metallurgical Plant, which are stored in a small dump at the western foot of Dumnaya mountain, has been studied. It has been found that they are represented by two types of slags that are different according to their mineralogical and geochemical characteristics. The first type is composed of a fayalite and pigeonite aggregate with the presence of magnetite, glass, forsterite, chalcocite, cuprostibite, domeykite and copper. The second type is represented by a fayalite and augite aggregate with the presence of magnetite, breithauptite and sulfides (idaite, cubanite, bornite, chalcopyrite, galena). The first type of slag is characterized by an "ultrabasic" geochemical trend, and the second by a "basite" trend. It has been concluded that the first type of slag has been obtained as a result of the remelting of "cement copper", and the second type has been obtained as a result of the processing of copper-sulphide ores of the Zuzelski deposit. **Practical Relevance.** The studied copper slags can be put into additional processing. They differ from each other according to their magnetic properties (the second type of slag is highly magnetic and can be easily separated). From the first type of slag, copper (with associated gold) can be separated, as well as magnetite concentrate containing titanium, vanadium and chromium. From the second type of slag, it is possible to separate sulfide concentrate containing not only copper, iron, zinc, but also lead and nickel using flotation. Magnetic separation can be used to separate magnetite concentrate, which also additionally contains titanium impurities and 5% ZnO.

Keywords: fayalite, pigeonite, magnetite, sulfides, mineralogy, slags, Polevskoy Metallurgical Plant.

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., Makarov A.B., Zakharov A.V., Khiller V.V., Leonova L.V. Material Composition of Copper Slags from the Polevskoy Metallurgical Plant. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 56-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-56-66>

Введение

Исследование медных шлаков является актуальной задачей как с точки зрения экологии, так и для возможного промышленного использования (многие из них представляют собой потенциальную руду). Переплавка медно-сульфидных руд для получения черновой меди всегда дает большой объем металлургического шлака. На современных медеплавильных предприятиях мира выход шлака в зависимости от

технологий составляет от 2 до 5 т на одну тонну получаемой черновой меди [1]. На сегодняшний день по всему миру накопились огромные объемы медных шлаков, в том числе и в Уральском регионе, который несколько столетий являлся одним из главных металлургических центров России. Изучением минералогии или вещественного состава медных шлаков занимаются многие ученые и в первую очередь ими исследуются отходы современных действующих меде-

плавильных предприятий, так как они являются центром экологических проблем и на них накоплены гигантские объемы шлака. При этом эти отходы, кроме меди, содержат и другие металлы, в том числе и благородные [1-3]. Получаемые в результате этих исследований данные позволяют заниматься вторичной переработкой шлаков и тем самым снижать экологическую нагрузку на окружающую среду.

Полевской медеплавильный завод находился в южной части одноименного города, расположенного на юге Свердловской области. Он был построен казной в 1724 году рядом с богатейшим Гумешевским медным рудником и одновременно являлся чугуноплавильным и железоделательным предприятием. В 1757 году Полевской завод вместе с Сысертским и Северским заводами был продан соликамскому купцу А.Ф. Турчанинову, который значительно увеличил производственные мощности всех предприятий. В 1787 году Полевской завод после смерти А.Ф. Турчанинова перешел в собственность его наследникам – многочисленным родственникам, которые создали семейно-паевое товарищество. С 1822 года завод перестал плавить чугун. В 1832 году в число пайщиков вошел П.Д. Соломирский, который стал активно скупать пай у своих родственников и в 1869 году он стал владельцем завода. При этом с 1861 по 1864 годы предприятие за долги отбиралось в казну. В 1870 году владельцем завода стал Д.П. Соломирский, сын прежнего хозяина. С 1871 года на предприятии стало преобладать железоделательное производство, а медь уже плавил по остаточному принципу, так как Гумешевский рудник закрылся. В 1891 году упразднили последнюю медную печь. В 1907 году на заводе прекратили делать железо, но возобновили выплавку меди из так называемой «цементной меди», которую получали при переработке старых отвалов Гумешевского рудника. В 1912 году Д.П. Соломирский, не имевший наследников, продал все свои предприятия, в том числе и Полевской завод, иностранным предпринимателям, которые основали акционерное общество «Сысертский горный округ». В 1917 году завод был национализирован и остановлен на период Гражданской войны. В 1920-1921 годах он поработал, а в 1922-1924 годах простоял на консервации. С 1925 года Полевской завод был передан в концессию акционерному обществу «Лена Голдфилдс» и стал активно работать, проплавляя медноколчеданные руды Зюзельского рудника и опять же «цементную медь». В 1928 году Зюзельский рудник закрылся и в 1930 году Полевской металлургический завод прекратил своё существование [4].

В настоящее время на бывшем месте металлургического предприятия функционирует Полевской машиностроительный завод. В качестве воспоминания о Полевском заводе остался только небольшой отвал медных шлаков у подножия Думной горы. Его изучением никто не занимался, и только недавно сотрудниками УГТУ (г. Екатеринбург) были получены

предварительные минералого-геохимические особенности этих шлаков [5]. Пару лет спустя сотрудниками ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург) была сделана попытка оценить эколого-геохимическое состояние заросшего шлакоотвала [6]. Приведенные данные оказались интересными, но без реальной оценки вещественного состава шлаков и понимания, какие минералы подвергались окислению и разрушению, они как бы «повисли в воздухе». Настоящая работа направлена на детальное изучение и определение минерального состава медных шлаков из отвала Полевского металлургического завода.

Отбор образцов шлака и методы исследования

Медные шлаки были отобраны нами в 2022 году в отвале, который расположен на правом берегу реки Полевой у западного и северо-западного подножия Думной горы. Отбор шлаков проводился по различным морфологическим признакам. Шлакоотвал местами задернован и переходит в склон горы, поэтому оценить его объем достаточно сложно. Шлаки имеют черный цвет, часто с красноватой патиной, их размер обычно не превышает 15-20 см. В некоторых образцах встречается обильная вкрапленность меди. На поверхности многих шлаков видны следы течения, а также пленки вторичной минерализации «медной зелени». Пористость шлаков средняя, в верхней части образцов количество пор увеличивается и достигает 10-15 об.%. Всего нами отобрано около 30 образцов, их внешний вид достаточно однородный. Из них для более детального минералогического анализа было отобрано шесть наиболее типовых образцов.

Микроэлементный (геохимический) состав шлаков был определен методом ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7700X (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, аналитик К.А. Филипова). 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 (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик Л.В. Леонова). Кристаллохимический пересчет минералов производился катионным методом (на количество катионов в минерале).

Полученные результаты

В результате проведенных исследований оказалось, что отобранные нами медные шлаки представлены двумя типами. Первый тип, который можно назвать медным, сложен оливин-пижонитовым агрегатом с присутствием магнетита и арсенидностибнидно-сульфидной минерализации, а также стекла и меди. Второй тип, медно-цинковый, представлен фаялит-авгитовым агрегатом со значительным присутствием магнетита и стибнидно-сульфидной минерализации. Микроэлементный (геохимический) состав шлаков подтверждает их минералогические раз-

личия (табл. 1). Первый тип характеризуется «гипербазитовым» геохимическим трендом – более высокими концентрациями хрома, никеля и низкими содержаниями РЗЭ. Второй тип отличается «базитовым» трендом – повышенными количествами титана, ванадия и РЗЭ. Для этого же типа характерны аномально высокие содержания цинка и свинца.

Первый тип медных шлаков представлен следующими минералами.

Фаялит ($\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$) является главным минералом в шлаке первого типа (около 50-55 об.%) и образует скелетные длиннопризматические кристаллы размером до 0,5 мм в длину (рис. 1). Индивиды оливина часто образуют специфическую структуру спинифекс, характерную для шлаков и вулканитов. По данным химического состава минерал относится к фаялиту и имеет четкую зональность: в центре он более магнезиальный, а по краям – железистый (табл. 2, анализы 1-2). По данным кристаллохимического пересчета оливин отвечает феррогортонолиту, только центральные зоны содержат 25% минала форстерита, а краевые – не более 13%. Фаялит характеризуется следующими примесями: MnO (до 0,8 мас.%), NiO (до 0,7 мас.%) и CaO (до 0,5 мас.%). В окружающем стекле встречаются мелкие иглы фаялита размером до 100 мкм в длину, которые по составу полностью соответствуют краевым зонам больших кристаллов фаялита.

Форстерит ($\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$) встречается в шлаке редко в виде оплавленных слабо удлинённых обломков, размером до 300 мкм по удлинению. По периферии эти обломки обрастают крустификационным агрегатом фаялита. По химическому составу минерал относится к форстериту и тоже имеет зональность: в цен-

тре крайне магнезиальный, а по краям и трещинам – более железистый (см. табл. 2, анализ 3). По данным кристаллохимического пересчета в центральной части обломков оливин является классическим форстеритом с низкой железистостью (минал фаялита не более 8,5%). В краевых зонах оливин уже относится к гиалосидериту с более высоким содержанием минала фаялита (34,5%). В центральной части отмечаются примеси NiO (до 0,4 мас.%), а в краевой – MnO (до 0,6 мас.%) и CaO (до 0,2 мас.%). По всей видимости, эти обломки являются реликтами гипербазитового вещества, которое попало в расплав вместе с рудой. В целом низкая железистость в форстерите характерна для многих гипербазитов из офиолитовых комплексов [7]. Краевая, более железистая зона является продуктом реакции форстерита с расплавом.

Пижонит ($(\text{Mg,Fe,Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$) является второстепенным минералом в шлаке (около 20 об.%) и встречается в интерстициях между призматическими индивидами фаялита (рис. 1, 2). Пироксен образует мелкие скелетные призматические индивиды размером не более 30 мкм, которые находятся в матрице стекла. Местами пироксена так много, что формируется его агрегат. По химическому составу пироксен уверенно определяется как железистый пижонит с содержанием CaO (в пределах 6,2-7,5 мас.%). В нем установлены примеси Al_2O_3 (до 9,7 мас.%), MgO (до 3,7 мас.%), MnO (до 1,2 мас.%) и TiO_2 (до 0,4 мас.%). В природе пижонит – типичный минерал вулканитов основного и ультраосновного состава, а также метеоритов. В шлаках этот пироксен встречается редко, нами он описывался в отходах медного производства Нейво-Рудянского завода [8].

Таблица 1. Геохимический состав шлаков Полевского завода, г/т

Table 1. Geochemical composition of slags of Polevskoy plant, ppm

Типы	1	2	Типы	1	2	Типы	1	2
Li	12,3	16,1	Zr	26,2	37,8	Eu	0,96	1,65
Be	0,80	1,19	Nb	0,80	1,13	Gd	2,99	5,85
B	8,71	8,39	Ag	<0,10	0,69	Tb	0,47	0,96
Sc	18,0	18,8	Mo	4,08	6,42	Dy	3,32	6,43
Ti	1363,0	1734,0	Cd	<0,22	<0,22	Ho	0,78	1,56
V	158,0	165,0	In	0,31	0,90	Er	2,42	4,65
Cr	117,0	58,6	Sn	2,87	4,85	Tm	0,35	0,70
Co	42,9	44,5	Sb	7,91	24,3	Yb	2,50	4,36
Ni	19,8	7,88	Te	<0,30	<0,30	Lu	0,39	0,72
Zn	587,0	2301,0	Cs	0,38	0,34	Hf	0,79	1,16
Ga	6,59	9,11	Ba	278,0	199,0	Ta	0,25	0,38
As	439,0	455,0	La	14,7	20,1	W	8,30	9,77
Se	<2,35	<2,35	Ce	21,5	23,8	Pb	39,8	181,0
Rb	6,75	8,35	Pr	2,34	3,94	Bi	<0,10	0,35
Sr	60,9	54,2	Nd	11,2	20,2	Th	1,02	1,45
Y	28,4	63,7	Sm	2,43	4,15	U	1,85	2,49

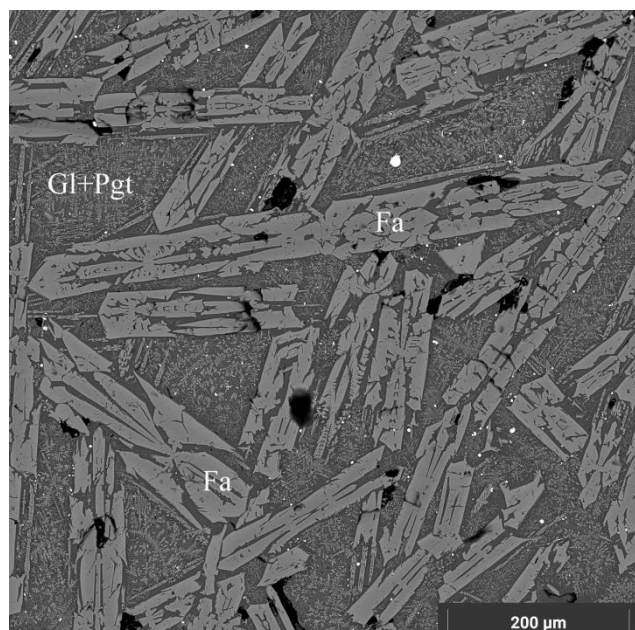


Рис. 1. Внешний вид медного шлака первого типа:
 Fa – фаялит, пижонит Gl+Pgt – в стекле.
 Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 1. Appearance of copper slag of the first type:
 Fa is fayalite, Gl+Pgt is pigeonite in glass. Photos
 in BSE mode, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

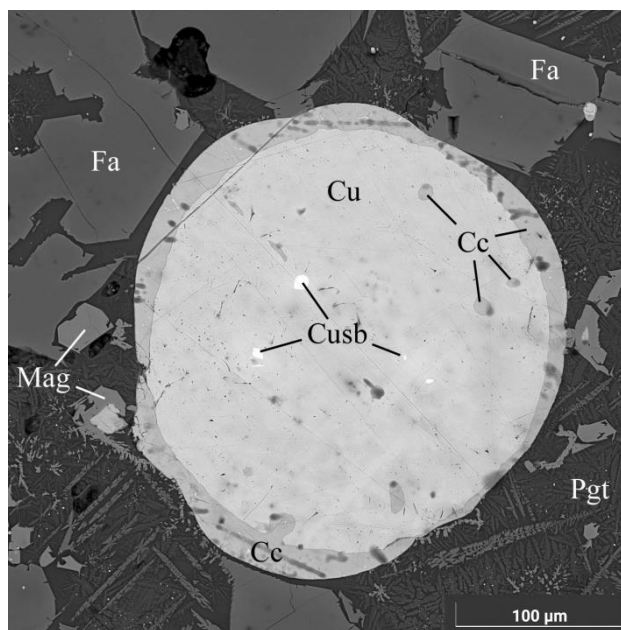


Рис. 2. Сферула меди в сульфидной оторочке
 и включениями купростибита: Cu – медь,
 Fa – фаялит, Pgt – пижонит, Mag – магнетит,
 Cc – халькозин, Cusb – купростибит.
 Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 2. Copper spherule in a sulphide rim and cuprostibite
 inclusions: Cu is copper, Fa is fayalite,
 Pgt is pigeonite, Mag is magnetite,
 Cc is chalcocite, Cusb is cuprostibite. Photos
 in BSE mode, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

Таблица 2. Химический состав оливина и пижонита, мас. %
 Table 2. Chemical composition of olivine and pigeonite, wt. %

Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Сумма
Фаялит									
1ц	31,80	-	-	55,70	0,61	0,78	10,70	0,41	100
1кр	30,79	-	-	61,23	-	0,79	6,65	0,54	100
2ц	32,18	-	-	55,87	-	0,66	10,87	0,42	100
2кр	30,78	-	-	61,77	0,68	0,83	5,45	0,49	100
Форстерит									
3ц	40,75	-	-	8,45	0,38	-	50,42	-	100
3кр	36,96	-	-	30,28	-	0,63	31,95	0,18	100
Пижонит									
4	41,94	0,44	8,91	37,60	-	1,21	3,71	6,19	100
5	41,96	0,43	9,67	36,24	-	0,90	3,27	7,53	100
Кристаллохимические формулы									
1ц	$(\text{Fe}_{1,45}\text{Mg}_{0,50}\text{Mn}_{0,02}\text{Ni}_{0,02}\text{Ca}_{0,01})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
1кр	$(\text{Fe}_{1,64}\text{Mg}_{0,32}\text{Mn}_{0,02}\text{Ca}_{0,02})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
2ц	$(\text{Fe}_{1,46}\text{Mg}_{0,51}\text{Mn}_{0,02}\text{Ca}_{0,01})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
2кр	$(\text{Fe}_{1,68}\text{Mg}_{0,26}\text{Mn}_{0,02}\text{Ca}_{0,02}\text{Ni}_{0,02})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
3ц	$(\text{Mg}_{1,83}\text{Fe}_{0,17}\text{Ni}_{0,01})_{2,01}[\text{Si}_{0,99}\text{O}_4]$								
3кр	$(\text{Mg}_{1,29}\text{Fe}_{0,69}\text{Mn}_{0,01}\text{Ca}_{0,01})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
4	$(\text{Fe}_{1,29}\text{Ca}_{0,27}\text{Mg}_{0,23}\text{Al}_{0,15}\text{Mn}_{0,04}\text{Ti}_{0,01})_{2,00}[(\text{Si}_{1,72}\text{Al}_{0,28})_{2,00}\text{O}_6]$								
5	$(\text{Fe}_{1,24}\text{Ca}_{0,33}\text{Mg}_{0,20}\text{Al}_{0,19}\text{Mn}_{0,03}\text{Ti}_{0,01})_{2,00}[(\text{Si}_{1,72}\text{Al}_{0,28})_{2,00}\text{O}_6]$								

Примечание: ц – центр зерна, кр – край зерна.

Стекло в шлаке отмечается часто, его количество достигает 15 об.%. Оно выполняет интерстиции между индивидами фаялита и содержит многочисленные включения силикатов и рудных минералов. Чистые участки стекла встречаются вблизи крупных кристаллов фаялита, их размер редко превышает 20-30 мкм. Представительный состав этого стекла следующий (в мас.%): SiO₂ – 51,26; TiO₂ – 0,47; Al₂O₃ – 15,80; FeO – 20,04; MnO – 0,57; MgO – 0,75; CaO – 10,01; Na₂O – 0,38; K₂O – 0,72. На диаграмме TAS данное стекло попадает в поле основных пикробазальтов, то есть относится к нормальным основным вулканитам.

Магнетит (Fe²⁺Fe³⁺₂O₄) в шлаке встречается редко (не более 5 об.%) и образует изометричные округлые или скелетные зерна (см. **рис. 2**) размером до 100 мкм, которые тяготеют к медно-сульфидным сферам. Кроме того, встречается среди пижонитового агрегата, где образует «салютобразные» дендриты. По составу минерал относится к магнетиту и характеризуется повышенным содержанием глинозема (Al₂O₃ до 5,5 мас.%), что отвечает 12% минала герцинита. Из других примесей отмечаются хром (Cr₂O₃ до 2,9 мас.%), титан (TiO₂ до 1,4 мас.%), магний (MgO до 0,8 мас.%) и ванадий (V₂O₃ до 0,5 мас.%). Кристаллохимическая формула: (Fe²⁺_{0,96}Mg_{0,04})_{1,00}(Fe³⁺_{1,62}Al_{0,24}Cr_{0,09}Ti_{0,04}V_{0,01})_{2,00}O₄.

Халькозин (Cu₂S) является главным минералом серы в шлаке первого типа. Он встречается исключительно в парагенезисе с медью, слагая оторочки вокруг металла, мощностью до 50 мкм. Кроме того, образует округлые или неправильные включения меди и в зернах магнетита. Химический состав сульфида (в мас.%, среднее из 27-ми анализов): Cu – 78,51; S – 19,81; Fe – 1,68, хорошо пересчитывается на кристаллохимическую формулу халькозина – (Cu_{0,97}Fe_{0,04})_{2,01}S_{0,99}.

Купростибит (Cu₂Sb) встречается в шлаке крайне редко и исключительно в виде изометричных включений, размером до 10 мкм, в матрице меди (см. **рис. 2**). Включения обычно приурочены к центральной части крупных сферул металла. Минерал имеет следующий химический состав (в мас.%, среднее из 5 анализов): Cu – 47,58; Ni – 3,78; Sb – 44,86; As – 2,24; Bi – 1,54, который пересчитывается на кристаллохимическую формулу купростибита – (Cu_{1,84}Ni_{0,16})_{2,00}(Sb_{0,91}As_{0,07}Bi_{0,02})_{1,00}. Нами он описывался в шлаках Среднеуральского медеплавильного завода [9].

Домейкит (Cu₃As) встречается в шлаке крайне редко и приурочен к мелким сферам меди. Установлен в виде небольших зон, мощностью до 15 мкм, на краю сферул. Минерал имеет следующий химический состав (в мас.%, среднее из 3-х анализов): Cu – 61,38; Fe – 3,78; As – 18,90; Sb – 14,99, который удовлетворительно пересчитывается на кристаллохимическую формулу домейкита – (Cu_{2,71}Fe_{0,24})_{2,95}(As_{0,71}Sb_{0,34})_{1,05}. Природный домейкит обычно встречается в низкотем-

пературных гидротермальных жилах при температурах ниже 225°C, но он был найден и синтезирован и при более высоких температурах [10]. Этот минерал описывался в древних медных шлаках Ирана и был сделан вывод, что в ассоциации с медью он образовался при температуре 610°C [11].

Медь (Cu) образует сферулы размером до 1 см по всей матрице шлака. Металл обычно окаймлен оторочками халькозина и изредка содержит включения того же халькозина, купростибита и домейкита. По составу медь обычно содержит примесь Fe (в пределах 1,9-4,2 мас.%) и изредка As (до 4,6 мас.%). Интересно, что изредка в шлаке первого типа встречаются шарики меди, обогащенные золотом (до 15% Au).

Второй тип медных шлаков представлен следующими минералами.

Фаялит (Fe₂[SiO₄]) является главным минералом и в шлаке второго типа (около 40-45 об.%). Он образует скелетные длиннопризматические кристаллы размером до 1 мм в длину (**рис. 3**). Визуально индивиды оливина более расщепленные, чем фаялит из шлака первого типа. По составу минерал относится к фаялиту (**табл. 3**, анализы 1-2) и содержит примеси ZnO (до 8,1 мас.%), MgO (до 2,7 мас.%) и CaO (до 1,0 мас.%), то есть рассчитываются миналы виллемита (до 10%), форстерита (до 6,5%) и кальциооливина (до 2%). По данным кристаллохимического пересчета оливин отвечает феррогортонолиту. Цинк содержащий фаялит является типоморфным минералом медных шлаков Среднеуральского завода [9].

Авгит ((Ca,Mg,Fe)₂[Si₂O₆]) тоже является главным минералом в шлаке второго типа (около 30-35 об.%) и встречается в пространстве между индивидами фаялита (**рис. 3, 4**). Пироксен образует короткопризматические индивиды размером не более 200 мкм по удлинению. Агрегат пироксена сплошной и не содержит стекла (возможно, пироксен образовался за счет раскристаллизации стекла). Полученные анализы пироксена попадают в поле авгита, недалеко от области развития пижонита. Август содержит примеси ZnO (до 5,4 мас.%), Al₂O₃ (до 5,3 мас.%), BaO (до 1,2 мас.%), K₂O (до 1,1 мас.%) и MgO (до 0,6 мас.%).

Магнетит (Fe²⁺Fe³⁺₂O₄) в шлаке второго типа вполне распространен (до 15-20 об.%) и слагает изометричные и слабовытянутые, хорошо образованные кристаллы (см. **рис. 3, 4**) размером до 300 мкм. Основная масса шпинелида приурочена к индивидам фаялита. По химическому составу шпинелид относится к магнетиту и характеризуется повышенным содержанием цинка (ZnO до 5,2 мас.%), что отвечает 15% минала франклинита. Из других примесей отмечаются алюминий (Al₂O₃ до 3,0 мас.%), титан (TiO₂ до 2,0 мас.%) и кремний (SiO₂ до 0,9 мас.%). Кристаллохимическая формула: (Fe²⁺_{0,85}Zn_{0,15})_{1,00}(Fe³⁺_{1,77}Al_{0,13}Ti_{0,06}Si_{0,04})_{2,00}O₄.

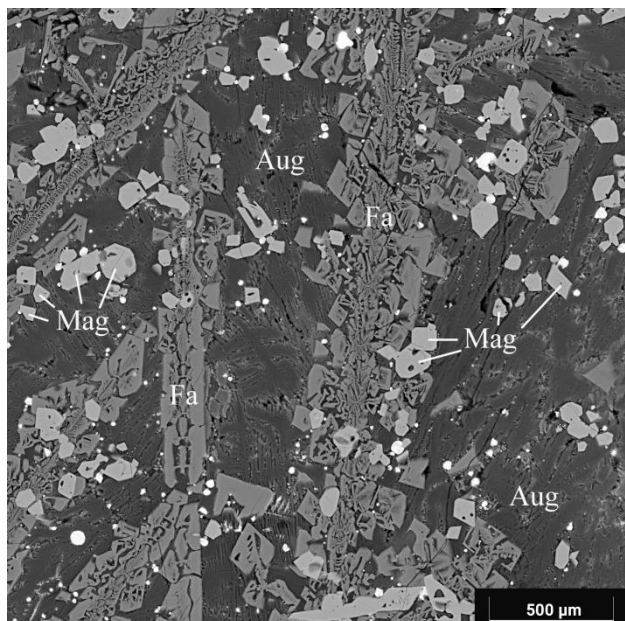


Рис. 3. Внешний вид медного шлака второго типа: Fa – фаялит, Mag – магнетит, Aug – авгит. Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 3. Appearance of copper slag of the second type: Fa is fayalite, Mag is magnetite, Aug is augite. Photos in BSE mode, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

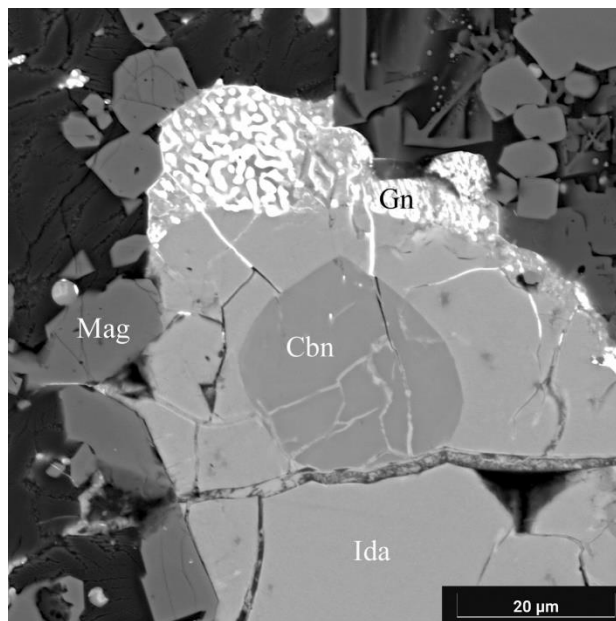


Рис. 4. Структура сульфидной сферулы: Cbn – кубанит, Ida – идаит, Gn – галенит, Mag – магнетит. Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 4. Structure of sulfide spherule: Cbn is cubanite, Ida is idaite, Gn is galena, Mag is magnetite. Photos in BSE mode, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

Таблица 3. Химический состав фаялита и авгита, мас. %

Table 3. Chemical composition of fayalite and augite, wt. %

Номер анализа	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	ZnO	MgO	BaO	CaO	K ₂ O	Сумма
Фаялит									
1ц	29,96	-	59,49	7,14	2,69	-	0,72	-	100
1кр	29,98	-	58,59	8,10	2,37	-	0,96	-	100
2ц	29,97	-	59,53	7,46	2,17	-	0,87	-	100
2кр	28,87	-	60,05	8,11	2,09	-	0,88	-	100
Авгит									
3	45,26	4,85	28,74	4,17	0,50	0,98	14,76	0,74	100
4	45,00	5,16	27,73	4,81	0,34	1,15	14,98	0,82	100
5	46,95	4,78	26,62	5,41	0,38	1,02	13,78	1,06	100
6	47,12	5,28	25,73	4,92	0,56	1,07	14,36	0,96	100
Кристаллохимические формулы									
1ц	(Fe _{1,66} Zn _{0,18} Mg _{0,13} Ca _{0,03}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]								
1кр	(Fe _{1,64} Zn _{0,20} Mg _{0,12} Ca _{0,04}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]								
2ц	(Fe _{1,67} Zn _{0,19} Mg _{0,11} Ca _{0,03}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]								
2кр	(Fe _{1,66} Zn _{0,20} Mg _{0,11} Ca _{0,03}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]								
3	(Ca _{0,66} Fe _{0,28} K _{0,04} Ba _{0,02}) _{1,00} (Fe _{0,71} Zn _{0,13} Al _{0,13} Mg _{0,03}) _{2,00} [(Si _{1,89} Al _{0,11}) _{2,00} O ₆]								
4	(Ca _{0,67} Fe _{0,27} K _{0,04} Ba _{0,02}) _{1,00} (Fe _{0,70} Zn _{0,15} Al _{0,13} Mg _{0,02}) _{2,00} [(Si _{1,88} Al _{0,12}) _{2,00} O ₆]								
5	(Ca _{0,62} Fe _{0,30} K _{0,06} Ba _{0,02}) _{1,00} (Fe _{0,63} Al _{0,18} Zn _{0,17} Mg _{0,02}) _{2,00} [(Si _{1,95} Al _{0,05}) _{2,00} O ₆]								
6	(Ca _{0,64} Fe _{0,29} K _{0,05} Ba _{0,02}) _{1,00} (Fe _{0,60} Al _{0,22} Zn _{0,15} Mg _{0,03}) _{2,00} [(Si _{1,96} Al _{0,04}) _{2,00} O ₆]								

Сульфиды Cu-Fe являются главными минералами серы в шлаке второго типа и встречаются по всей матрице породы, в основном тяготея к индивидам фаялита. Сульфиды Cu-Fe образуют полифазные сферулы (шарики) размером до 100 мкм в диаметре (см.

рис. 4). Они часто содержат включения галенита и сфалерита. Среди сульфидов Cu-Fe преобладает следующая фаза (в мас.%): S – 30-31; Fe – 18-19; Cu – 50-51, близкая по составу к идаиту – Cu₃FeS₄ (S – 34,2; Fe – 14,9; Cu – 50,9). В идаите часто отмечаются

округлые включения размером до 40 мкм, с другим химическим составом (в мас.%): S – 34-35; Fe – 40-41; Cu – 23-24, который хорошо коррелирует с *кубанитом* $CuFe_2S_3$ (S – 35,4; Fe – 41,2; Cu – 23,4). Кроме того, в идаите наблюдаются редкие структуры распада (пластинки до 5-10 мкм, более светлые в BSE-режиме) с более медистым составом (в мас.%; среднее из 5-ти анализов): S – 26,9; Fe – 11,2; Cu – 61,8, который вполне соответствует *борниту* Cu_3FeS_4 (S – 25,6; Fe – 11,1; Cu – 63,3). Интересно, что местами в матрице шлака встречаются сульфидные шарики размером до 50 мкм с совсем другим составом (S – 34,2; Fe – 30,3; Cu – 34,3; Zn – 1,2), близким по составу к *халькопириту* – $CuFeS_2$ (S – 34,9; Fe – 30,4; Cu – 34,6).

Сфалерит (ZnS) образует ксеноморфные выделения на контакте с сульфидами Cu-Fe размером до 40-50 мкм. По химическому составу сульфид цинка медистый и железистый (в мас.%; среднее из 22-х анализов): S – 33,31; Fe – 9,31; Zn – 56,36; Cu – 1,02, что в пересчете дает следующую кристаллохимическую формулу: $(Zn_{0,82}Fe_{0,16}Cu_{0,02})_{1,00}S_{1,00}$.

Галенит (PbS) образует каймы вокруг сульфидных шариков, иногда в виде каплевидной ориентированной (эвтектической) вкрапленности в матрице идаита (см. рис. 4). Размер зерен сульфида не более 10 мкм. По составу галенит достаточно чистый, из примесей в сульфиде отмечаются только железо (до 2,9 мас.%) и медь (до 1,5 мас.%). Температура плавления/кристаллизации сульфида свинца оценивается в пределах 1096 °C [12], что можно принять как температуру образования данных медных шлаков.

Брейтгаунтит (NiSb) встречается исключительно среди каплевидных скоплений галенита, образуя неправильной формы вытянутые зерна размером до 10 мкм. По химическому составу ((в мас.%; среднее по 6-ти анализам): Sb – 60,49; As – 5,47; Fe – 4,76; Co – 1,08; Ni – 26,49; Cu – 1,71) минерал хорошо пересчитывается на формулу стибнида никеля: $(Ni_{0,78}Fe_{0,15}Cu_{0,05}Co_{0,03})_{1,01}(Sb_{0,86}As_{0,13})_{0,99}$. Нами он описывался в шлаках Среднеуральского [9] и Благодатного [13] медеплавильных заводов.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате проведенного исследования в шлакоотвале Полевского металлургического завода отчетливо выделяются два типа медных шлаков.

Первый тип сложен фаялит-пижонитовым агрегатом с присутствием магнетита, стекла, форстерита, халькозина, купростибита, домейкита и меди. Как уже выше отмечалось, данный тип шлака характеризуется «гипербазитовым» геохимическим трендом. Это подтверждается и его минералогическими особенностями. В частности, находками в шлаке обломков форстерита и наличием повышенных примесей никеля с магнием в породообразующем фаялите. Об этом же говорят и примеси магния, хрома и ванадия в аксессуарном магнетите. К тому же пижонит является

типоморфным минералом вулканитов базитового и гипербазитового состава.

Второй тип представлен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, брейтгаунтита и сульфидов (идаита, кубанита, борнита, халькопирита, галенита). Геохимия данного типа шлака имеет «базитовый» тренд и характеризуется более высокими содержаниями халькофильных элементов (даже аномальных по цинку и свинцу). Минералогия подтверждает микроэлементный состав шлака. Так, во всех породообразующих минералах, то есть в фаялите и авгите, а также в магнетите, отмечается повышенная примесь цинка. Кроме того, в породе присутствуют собственные минералы цинка и свинца – сфалерит и галенит соответственно.

Находка двух разных типов шлака хорошо увязывается с тем, что в последние годы своего существования Полевской завод получал руду из двух мест: перерабатывал «цементную медь» с Гумешевского рудника и медноколчеданные руды с Зюзельского месторождения [4, 5].

Гумешевский рудник прекратил свою работу в 1872 году и до начала XX века шла переработка его отвалов. В начале прошлого века на месте рудника стал функционировать Гумешевский медеизвлекательный завод, то есть гидрометаллургическое предприятие по извлечению меди из окисленных руд (сернокислотное выщелачивание металла из отвалов в виде цементации). Он действовал с 1908 года, и в 1919 году сгорел. В советские годы на Гумешевском руднике выщелачивание меди проводили только при концессионных работах 20-х годов, а позднее только планировали добывать [14]. Извлечение меди из зоны окисления Гумешек началось в современный период в 2005 году [15]. Учитывая исторические данные и время закрытия Полевского завода, можно уверенно говорить, что шлаки первого типа получились в результате переплавки «цементной меди».

Зюзельское колчеданное месторождение было открыто в 1902-1903 годах и в верхней части объекта вскрылась пиритовая залежь [16], которую решили использовать для производства серной кислоты. В 1907 году заработал Полевской сернокислотный завод, который и позволил запустить то самое выщелачивание на отвалах Гумешевского рудника. В 1910-х годах в восточной части Зюзельского рудника были обнаружены колчеданные залежи с высоким содержанием меди, цинка, золота и серебра, поэтому эти руды стали плавить на Полевском металлургическом заводе. На время Гражданской войны разработки были остановлены, а после 1925 года Зюзельский рудник был передан в концессию акционерному обществу «Лена Голдфилдс», которая переплавляла руды на Полевском заводе (до самого закрытия завода в 1930 году). Учитывая все эти данные, очевидно, что шлаки второго типа получились в результате пере-

плавки медноколчеданных руд Зюезельского месторождения.

При этом отсутствие старых (XVIII-XIX века) медеплавильных шлаков вокруг Полевского завода не должно удивлять, так как предприятие параллельно занималось чугуноплавильным производством, а при выплавке чугуна в то время добавляли немного медного шлака (для легирования металла и улучшения литейных свойств). Вполне возможно, что после 1822 года, когда на Полевском заводе прекратили выплавлять чугун, медные шлаки для этих же целей вывозили на близлежащий Северский металлургический завод (предприятиями владела одна семья), который продолжал делать чугун.

Визуально изученные шлаки практически не отличаются, но у них различаются физические свойства. Первый тип шлака немагнитен, а второй тип, наоборот, сильномагнитный (благодаря высокому содержанию магнетита), что позволяет достаточно легко разделить шлаки друг от друга в случае потенциальной переработки шлакоотвала.

В целом медные шлаки Полевского завода могут быть переработаны. Из первого типа шлака можно выделить медь (с попутным золотом), а также магнетитовый концентрат, содержащий титан, ванадий и хром. Оставшаяся силикатная масса с высоким содержанием FeO является потенциальной железной рудой, которую можно временно складировать до получения рентабельной технологии добычи железа из силикатов. Из второго типа шлака с помощью флотации можно выделить сульфидный концентрат, содержащий не только медь, железо, цинк, но и свинец с никелем. Магнитной сепарацией можно выделить концентрат магнетита, который к тому же дополнительно содержит примеси титана и 5% ZnO. Оставшаяся силикатная масса с фаялитом и авгитом содержит не только железо, но и цинк, что возможно уже делает рентабельным добычу этих металлов из силикатов.

Изученный нами шлакоотвал желателно переработать не только из-за содержащихся в нем ценных металлов, но и из-за существующих экологических проблем. Как уже говорилось, была сделана попытка оценить эколого-геохимическое состояние шлакоотвала [6]. По данным этих авторов, в почвенном слое, формирующемся над шлакоотвалом, фиксируются ураганные содержания цинка, свинца, меди, мышьяка и других элементов, которые смываются поверхностными водами в рядом расположенную реку Полевую. Судя по приведенному геохимическому спектру, в данном шлакоотвале идет активное разложение шлаков второго типа, которые как раз и содержат медноцинковые сульфиды. При этом, чтобы снизить экологические проблемы, достаточно из шлакоотвала убрать/вывезти шлаки второго типа, которые можно легко отделить и складировать их на другую площадку, в стороне от водосбора и т.д.

Заключение

Таким образом, нами детально рассмотрена минералогия медных шлаков Полевского металлургического завода. Установлено, что они представлены двумя типами, отличающимися друг от друга минералого-геохимическими характеристиками. Первый тип сложен фаялит-пижонитовым агрегатом с присутствием магнетита, стекла, форстерита, халькозина, купростибита, домейкита и меди. Второй тип представлен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, брейтгауптита и сульфидов (идаита, кубанита, борнита, халькопирита, галенита). Первый тип шлака характеризуется «гипербазитовым» геохимическим трендом, а второй – «базитовым». Сделан вывод, что шлаки первого типа получились в результате переплавки «цементной меди», а второго типа – медноколчеданных руд Зюезельского месторождения. Шлаки Полевского завода можно переработать с выделением сульфидного и магнетитового концентратов. Шлаки второго типа активно разлагаются и заражают окружающую среду выносом халькофильных элементов, а также свинца, мышьяка и других элементов.

Список источников

1. Mineralogical properties of the copper slags from the Sar Cheshmeh smelter plant, Iran / Nasab M.S., Bafti S.B., Yarahmadi M.R., Maymand M.M., Khorasani K.J. // Minerals. 2022, vol. 12, article 1153. DOI: 10.3390/min12091153
2. Вещественный состав медных шлаков Алмалыкского медеплавильного завода (Узбекистан) / Сайитов С.С., Цой В.Д., Расулов Ш.М., Печерский Р.Д., Расулова А.В., Абдувайтов А.К., Асроров А.А. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2024. Т. 335. № 4. С. 148–158. DOI:10.18799/24131830/2024/4/4292
3. Determination of quantitative ratios (mechanical and dissolved) of copper, gold and silver losses in Vanyukov furnace slags under the conditions of the Balkhash Copper Smelter in Kazakhstan / Dosmukhamedov N., Shambulaev B., Dityatovskiy L., Zholdasbay Y., Argyn A. // Recycling. 2025, vol. 10, article 181. DOI: 10.3390/recycling10050181
4. Металлургические заводы Урала XVII–XX вв. Энциклопедия / под ред. В.В. Алексеева. Екатеринбург: Изд-во Академкнига, 2001. 536 с.
5. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Койнов С.А. Минералого-геохимические особенности старолежалых шлаков Полевского медеплавильного завода (Средний Урал, Свердловская область) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2018. № 21. С. 430–435.
6. Золотова Е.С., Рябинин В.Ф. Экологическая геохимия старого отвала медеплавильного шлака на Среднем Урале // Известия УГТУ. 2020. Вып. 2(58). С. 103–109.
7. Petrogenesis of Jian forsterite jade solely composed of end-member forsterite (Fo 99.8): Constrained by trace element and oxygen isotope / Peng B., He M., Yang M., Liu X., Sui X., Sun K., Wu Sh. // Ore Geology Re-

- views. 2022, vol. 150, article 105167. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.105167
8. Ерохин Ю.В., Тупиков И.Н., Ширяев П.Б. Медные шлаки Нейво-Рудянского завода (вещественный состав и геоэкология) // Отходы и ресурсы. 2025. Т. 12. № 3. Статья 09NZOR325. DOI:10.15862/09NZOR325
 9. 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. DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87
 10. Михеев В.И. Об альфа-, бета- и гамма-домейките // Записки ВМО. 1949. Ч. 78. № 1. С. 3–7.
 11. Emami M. «Toroud», The late motion for As-Sb bearing Cu production from 2nd millennium BC in Iran: An archaeometallurgical approach // Mediterranean Archaeology and Archaeometry. 2014, vol. 14(2), pp. 185–204.
 12. Самсонов Г.В., Дроздова С.В. Сульфиды. М.: Металлургия, 1972. 304 с.
 13. Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. Шлаки Благодатного медеплавильного завода (состав и геоэкология) // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 5. С. 75–86. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-5-75-86
 14. Юдыцкий А.П. Опыт подземного выщелачивания медных руд. М.: Экономиздат, 1962. 48 с.
 15. Инновационные технологии в реанимации ранее отработанных рудников на примере Гумешевского месторождения медистых глин / Алтушкин И.А., Левин В.В., Король Ю.А., Ситникова Т.И. // Цветные металлы. 2012. № 11. С. 37–41.
 16. Столяров Ю.М. Зюзельское колчеданное месторождение, Урал (новый взгляд на строение и генезис) // Уральский геологический журнал. 2003. № 3. С. 85–96.
 5. Makarov A.B., Khasanova G.G., Koynov S.A. Mineralogical and geochemical features of old slags of the Polevskoy copper smelter (Middle Urals, Sverdlovsk region). Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnyye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky]. Perm: Publishing House of Perm State University, 2018, vol. 21, pp. 430–435. (In Russ.)
 6. Zolotova E.S., Ryabinin V.F. Ecological geochemistry of an old copper smelting slag dump in the Middle Urals. Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta [Bulletin of Urals State Mining University]. 2020;(58):103-109. (In Russ.)
 7. Peng B., He M., Yang M., Liu X., Sui X., Sun K., Wu Sh. Petrogenesis of Jian forsterite jade solely composed of end-member forsterite (Fo 99.8): Constrained by trace element and oxygen isotope. Ore Geology Reviews. 2022;150:105167. doi:10.1016/j.oregeorev.2022.105167
 8. Erokhin Yu.V., Tupikov I.N., Shiryayev P.B. Copper slags of the Neivo-Rudyansky plant (material composition and geoecology). Otkhody i resursy [Waste and resources], 2025;12(3):09NZOR325. DOI: 10.15862/09NZOR325. (In Russ.)
 9. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S., Zakharov A.V., Shiryayev P.B., Leonova L.V. Material composition of slags of the Sredneuralsk copper smelter. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(2):78-87. DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87. (In Russ.)
 10. Mikheev V.I. On alpha-, beta- and gamma-domeykite. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union Mineralogical Society]. 1949;78(1):3-7. (In Russ.)
 11. Emami M. «Toroud», The late motion for As-Sb bearing Cu production from 2nd millennium BC in Iran: An archaeometallurgical approach. Mediter. Archaeol. Archaeom. 2014;14(2):185-204.
 12. Samsonov G.V., Drozdova S.V. Sulfidy [Sulfides]. Moscow: Metallurgy, 1972, 304 p. (In Russ.)
 13. Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V. Slags of the Blagovatnoye copper smelter (composition and geoecology). Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2021;(5):75-86. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-5-75-86. (In Russ.)
 14. Yudytsky A.P. Opyt podzemnogo vyshchelachivaniya mednykh rud [Experience of underground leaching of copper ores]. Moscow: Ekonomizdat, 1962, 48 p. (In Russ.)
 15. Altushkin I.A., Levin V.V., Korol Yu.A., Sitnikova T.I. Innovative technologies in the resuscitation of previously developed mines on the example of the Gumeshevsky copper clay deposit. Tsvetnyye metally [Non-ferrous metals]. 2012;(11):37-41. (In Russ.)
 16. Stolyarov Yu.M. Zyuzelskoye pyrite deposit, Urals (new look at structure and genesis). Uralskiy geologicheskii zhurnal [Ural Geological Journal]. 2003;(3):85-96. (In Russ.)

References

1. Nasab M.S., Bafti S.B., Yarahmadi M.R., Maymand M.M., Khorasani K.J. Mineralogical properties of the copper slags from the Sar Cheshmeh smelter plant, Iran. Minerals. 2022;12:1153. DOI: 10.3390/min12091153
2. Sayitov S.S., Tsoi V.D., Rasulov Sh.M., Pechersky R.D., Rasulova A.V., Abduvaitov A.K., Asrorov A.A. Material composition of copper slags of the Almalyk copper smelter (Uzbekistan). Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2024;335(4):148-158. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4292> (in Russ.)
3. Dosmukhamedov N., Shambulayev B., Dityatovskiy L., Zholdasbay Y., Argyn A. Determination of quantitative ratios (mechanical and dissolved) of copper, gold and silver losses in Vanyukov furnace slags under the conditions of the Balkhash Copper Smelter in Kazakhstan. Recycling, 2025;10:181. DOI: 10.3390/recycling10050181
4. Alekseev V.V. (ed.) 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.)

Поступила 17.07.2025; принята к публикации 03.02.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 17/07/2025; revised 03/02/2026; published 30/06/2026

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

Макаров Анатолий Борисович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: makarova211253@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-4843-3422

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

Хиллер Вера Витальевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: hilvervit@mail.ru. ORCID: 000-0001-8491-4958

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 Researcher,
The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-0577-5898

Anatoly B. Makarov – DrSc (Eng.), Professor,
Urals State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Email: makarova211253@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-4843-3422

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

Vera V. Khiller – PhD (Eng.), Senior Researcher,
The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: hilvervit@mail.ru. ORCID: 000-0001-8491-4958

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