



УДК 549.0+669.181.28(470.5)

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-3-3>

МИНЕРАЛОГИЯ МЕДНЫХ ШЛАКОВ ПЕТРОПАВЛОВСКОГО ЗАВОДА (СЕВЕРОУРАЛЬСК, СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Ю.В. Ерохин¹, М.В. Цыганко², В.В. Хиллер¹, П.Б. Ширяев¹, Н.Н. Фаррахова¹

¹Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, ул. Академика Вонсовского, д. 15,
Екатеринбург, 620110 Россия; erokhin-yu@yandex.ru

²Минералогический музей «Штуфной кабинет», ул. Ватутина, д. 17а,
Североуральск, Свердловская обл., 624480 Россия; zigankom@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.06.2025 г., после доработки 08.07.2025 г., принята к печати 24.07.2025 г.

Аннотация. Объектом настоящего изучения стали медные шлаки Петропавловского завода, действовавшего с 1760 по 1822 гг. на территории одноименного поселка, впоследствии ставшего современным г. Североуральском (Свердловская область). Вещественный состав исследованных образцов изучен методами сканирующей электронной микроскопии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и рентгеноспектрального анализа. Шлаки сложены фаялит-геденбергитовым агрегатом с присутствием искорита, магнетита, стекла, металлической меди, борнита, дигенита (?), сфалерита и галенита. Вторичная минерализация представлена купритом, брошантитом, баритом и атакамитом. Изученные шлаки образовались в результате выплавки меди из халькопиритовых руд с примесью сфалерита, которые добывались на близлежащих Турьинских рудниках и других мелких рудопроявлениях, расположенных в окрестностях Петропавловского завода.

Ключевые слова: Северный Урал, Петропавловский завод, медные шлаки, минералогия, медь, геденбергит, фаялит, искорит.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с рукописью.

Вклад авторов. Ю.В. Ерохин – разработка концепции, исследование, написание рукописи; М.В. Цыганко – отбор проб, редактирование финального варианта рукописи; В.В. Хиллер – исследование, написание рукописи; П.Б. Ширяев – аналитические работы, редактирование финального варианта рукописи; Н.Н. Фаррахова – аналитические работы. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Ерохин Ю.В., Цыганко М.В., Хиллер В.В., Ширяев П.Б., Фаррахова Н.Н. Минералогия медных шлаков Петропавловского завода (Североуральск, Свердловская область). Минералогия, 2025, 11(3), 37–50. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-3-3

MINERALOGY OF COPPER SLAGS FROM THE PETROPAVLOVSKY PLANT (SEVEROOURALSK, SVERDLOVSK REGION)

Yu.V. Erokhin¹, M.V. Tsyganko², V.V. Khiller¹, P.B. Shiryaev¹, N.N. Farrakhova¹

¹Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Akademika Vonsovskogo Str., 15,
Yekaterinburg, 620110 Russia; erokhin-yu@yandex.ru

²Mineralogical Museum «Shtufnoi Kabinet», Vatutina Str., 17a, Severouralsk,
Sverdlovsk oblast, 624480 Russia; zigankom@mail.ru

Received 11.06.2025, revised 08.07.2025, accepted 24.07.2025

Abstract. The object of study includes the copper slags of the Petropavlovsk plant, which had been operated since 1760 to 1822 in area of an eponymous settlement, which was further transformed to town of Severouralsk (Sverdlovsk region). The composition of samples was determined using scanning electron microscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry and X-ray spectral analysis. The slags are composed of fayalite-hedenbergite aggregates with iscorite, magnetite, glass, metallic copper, bornite, digenite (?), sphalerite and galena. Secondary mineralization includes cuprite, brochantite, barite and atacamite. The slags are a result of smelting of sphalerite-bearing chalcopyrite ores, which were extracted at the nearby Tur'ya mines and other small ore occurrences located in the vicinity of the Petropavlovsk plant.

Key words: North Urals, Petropavlovsk plant, copper slag, mineralogy, copper, hedenbergite, fayalite, iscorite.

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation and the Government of the Sverdlovsk region, grant no. 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. Yu.V. Erokhin – concept development, research, manuscript writing; M.V. Tsyganko – sample selection, editing the final version of the manuscript; V.V. Khiller – research, manuscript writing; P.B. Shiryayev – analytical work, editing the final version of the manuscript; N.N. Farrakhova – analytical work. All authors approved the final version of the article before publication.

For citation: Erokhin Yu.V., Tsyganko M.V., Khiller V.V., Shiryayev P.B., Farrakhova N.N. Mineralogy of copper slags from the Petropavlovsky plant (Severouralsk, Sverdlovsk region). *Mineralogy*, 2025, 11(3), 37–50. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-3-3

ВВЕДЕНИЕ

Исследование медных шлаков является актуальной задачей как с точки зрения экологии, так и для возможного промышленного использования, т. к. 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 тонну получаемой черновой меди (Sanchez, Sudbury, 2013). 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 исследователи. В первую очередь, изучаются отходы современных действующих медеплавильных предприятий, т. к. они являются центром экологических проблем и на них накоплены гигантские объемы шлака и кроме меди, содержат и другие металлы, в том числе и благородные (Сабанова, Орехова, 2017; Lohmeier et al., 2021; Nasab et al., 2022; Сайитов и др., 2024). Получаемые в результате этих исследований данные позволяют заниматься вторичной переработкой отвалов шлака и снижать экологическую нагрузку на окружающую среду. При этом

надо отметить, что старинные медные заводы в настоящее время редко попадают в зону внимания исследователей. Дело в том, что с такими заводами не связаны какие-либо значимые объемы шлакоотвалов, а значит, нет ярко выраженных экологических проблем и перспектив их вторичной переработки. Старинные и древние лежалые отвалы шлаков исследуют либо с целью археологических изысканий (Artemyev et al., 2018), либо ради интересных и уникальных минералогических находок. Например, в последнее время активно изучаются античные шлаки Лавриона (Аттика, Греция), где установлено богатое минеральное разнообразие в виде галогидов, арсенатов и сульфатов свинца, меди, железа, цинка и серебра (Pekov et al., 2011).

В настоящей работе мы приводим результаты изучения медных шлаков Петропавловского завода, который был основан М.М. Походяшиным и около 30 лет был семейным предприятием купеческого рода Походяшиных, известных заводчиков Российской империи и крупнейших поставщиков российской меди второй половины XVIII века. Цель исследования – изучение минералогии медных шлаков Петропавловского завода для оценки их возможного использования в дальнейшем металлургическом переплаве.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ПЕТРОПАВЛОВСКОГО ЗАВОДА

В 1752–1754 гг. верхотурский рудознатец Григорий Никифорович Посников обнаружил в районе будущего Петропавловского завода залежи медных и железных руд. Этим заинтересовался верхотурский купец Максим Михайлович Походяшин, один из богатейших людей того времени, наживший огромное состояние на винокурении, винных откупах и подрядах. Он выкупил у Г.Н. Посникова право на разработку найденных руд и уже 3 декабря 1757 г. подал прошение в Берг-коллегию о строительстве чугуноплавильного и железоделательного завода, которое было удовлетворено. Из-за полного отсутствия дорог и нехватки рабочих рук строительство затянулось. К заводу были приписаны 4200 крестьян Чердынского уезда Пермской губернии, которым приходилось добираться до завода около 300 км. В 1760 г. у М.М. Походяшиным были найдены богатые залежи в Турьинских медных рудниках, и в этом же году на р. Колонга недалеко от ее впадения в р. Вагран стал действовать Петропавловский завод с домной и одним молотом (Алексеев, 2001; Аверина, 2015), названный в честь святых апостолов Петра и Павла (Сысуев, 2019).

При этом оказалось, что р. Колонга дает недостаточно воды и половину года домна с молотом простаивала. По этой причине на заводе срочно стали запускать медеплавильное производство и уже к 1 мая 1761 г. было построено шесть печей. В 1764 г. на завод прибыло 3520 ссыльных крестьян, что существенно улучшило ситуацию с рабочими руками. Для облегчения перемещения крестьян Чердынского уезда отсюда до Петропавловского завода была построена дорога длиной более 150 км через Уральский хребет. В 1764 г. на предприятии выплавляли одну тыс. пудов меди, в 1765 г. – 3.9 тыс. пудов меди, поэтому в 1767 г. действовало уже девять медеплавильных печей, а в 1768 г. – 14 печей. В 1766 г. в пяти верстах от завода была устроена вспомогательная плотина, что упростило работу чугуноплавильного и железоделательного производства. В 1766 г. на заводе действовали домна, два молота, 12 горнов и 15 медеплавильных печей (Алексеев, 2001; Сысуев, 2019).

В 1766 г. медной руды, поступающей с Турьинских рудников, стало так много, что Петропавловский завод уже не мог ее полностью переработать, поэтому в 1770 г. близ рудников был построен еще один медный завод – Богословский (ныне

г. Карпинск). С 1771 г. Петропавловский завод, имевший домну, три молота, 11 горнов и 14 медеплавильных печей уже работал на избыточной руде Турьинских рудников, т. е. на той, которую не успевал переработать Богословский завод. Основание нового предприятия снова обострило ситуацию с работоспособным населением, и для решения этой проблемы М.М. Походяшин переселил сюда часть крепостных крестьян с купленного им Пожевского завода (Алексеев, 2001), ныне пос. Пожва в Пермском крае.

В 1781 г. М.М. Походяшин умер и наследниками Петропавловского завода стали два его сына – Николай и Григорий. Предприятие в это время занималось, в основном, выплавкой меди, а домна работала временами и простаивала в отдельные годы (1780–1783, 1785, 1787–1789 гг.). Со временем братья Походяшины впали в немилость у императрицы Екатерины II и их принудительно (за 2.5 млн рублей) заставили продать Петропавловский и Богословский заводы, а также всю окружающую инфраструктуру. В 1791 г. Петропавловский завод перешел в собственность Государственного ассигнационного банка, а в 1797 г. он был передан в казну. С этого времени производство чугуна и железа было полностью прекращено. В 1797 г. на Петропавловском заводе работала каменная фабрика с 18 медеплавильными печами. В 1794 г. было произведено 11.2 тыс. пудов меди, в 1798 г. – 14.3 тыс. пудов, а в 1800 г. – 16.4 тыс. пудов металла. В начале XIX в. завод столкнулся с проблемой истощения медных рудников, в результате чего понизился объем производства: в 1801–1810 гг. выплавлено 86.8 тыс. пудов меди, а в 1811–1820 гг. – 55.8 тыс. пудов металла. Производство меди становилось все менее рентабельным, т. к. происходил рост затрат и опять возникла нехватка рабочих рук в связи с трудными условиями проживания в северном крае. В 1818 г. правительство направило на Богословский и Петропавловский заводы 1000 рекрутов, из которых в течение года умерло 800 душ. В этой ситуации казна стала перемещать производство меди на Богословский завод, постепенно сокращая выплавку металла на Петропавловском предприятии. В 1821–1822 гг. на Петропавловском заводе было произведено 9.7 тыс. пудов меди, а затем предприятие было остановлено (Алексеев, 2001; Аверина, 2015; Сысуев, 2019).

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Шлаки (12 образцов) отобраны одним из авторов статьи в июле 2024 г. у основания церкви Петра и Павла, которая расположена на южной окраине г. Североуральска на левом берегу р. Колонги (рис. 1). Церковь является символом города и была заложена в 1767 г., а достроена только в 1798 г. после передачи завода из семьи Походяшиных в царскую казну. Шлаки обнаружены с южной стороны церкви (GPS координаты: 60°14'42.9" с.ш., 59°94'15.6" в.д.), где они отсыпаны на речную террасу (рис. 2а, 2б). По всей видимости, шлаки использовались для выравнивания площадки под застройку церкви, и в целом они встречаются везде в окрестностях бывшего завода. Из отобранных шлаков выделено пять типовых образцов для изучения минерального и микроэлементного состава.

Химический состав минералов и фотографии в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE) 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 Н.Н. Фаррахова). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из образцов. Состав минералов пересчитывался на кристаллохимические формулы с применением катионного метода.

Петрогенные компоненты определены на рентгенофлуоресцентном волновом спектрометре XRF 1800 фирмы Shimadzu, который оснащен мощной (4 кВт) рентгеновской трубкой (Rh-анод), кристаллами-анализаторами TAP, PET, Ge, LiF (200), а также стабилизатором вакуума, проточно-пропорциональным и сцинтилляционным счетчиками (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик Л.А. Татаринова). Потери при прокаливании установлены методом мокрой химии. Из-за высокого содержания железа в пробе определение отношения окисной и закисной формы железа не проводилось. Микроэлементный состав шлака был определен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре Agilent 7700X (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, аналитик К.А. Филиппова).

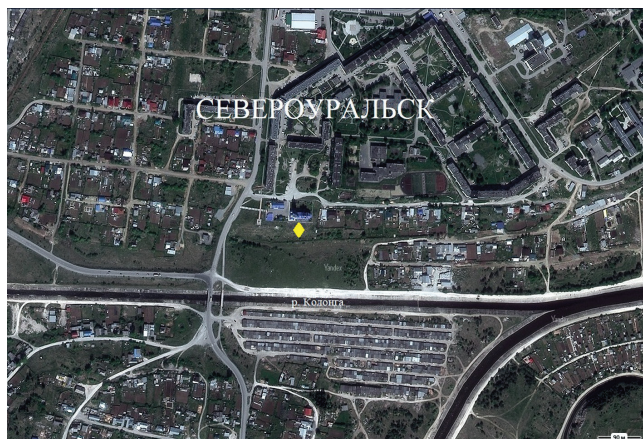


Рис. 1. Фрагмент Яндекс.Карты южной окраины г. Североуральска с местом отбора шлака (желтый ромб).

Fig. 1. Fragment of the Yandex.Map of the southern outskirts of Severouralsk with a sampling place (yellow rhomb).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Шлаки имеют черную окраску с зеленоватыми налетами вторичных минералов (рис. 2в, г). Среди шлаков часто встречаются капли, всплески и проволоочки меди, поверхность которой также покрыта медной зеленью. Шлаки сложены пироксен-оливиновым агрегатом с присутствием искорита, магнетита, стекла, металлической меди, борнита, высокомедистого сульфида, сфалерита и галенита (рис. 3). Химический и микроэлементный состав шлака представлен в таблице 1. Присутствие потерь при прокаливании указывает на небольшие вторичные изменения породы.

Пироксен является главным минералом шлаков: его содержание достигает 60–65 об. %. Он составляет основную матрицу породы в виде агрегата коротко- и длиннопризматических индивидов размером до 5 мм в длину (рис. 3–6). В интерстициях между крупными индивидами встречаются мелкие зерна пироксена. Минерал практически не содержит включений, изредка отмечается вкрапленность сульфидов и меди. По химическому составу пироксен соответствует геденбергиту (табл. 2). В крупных индивидах проявлена резкая химическая зональность. Так, центральная часть зерен представлена геденбергитом с избыточным содержанием Ca (содержание минала волластонита достигает 16 %) и примесями Mg (до 1.6 мас. % MgO), Mn (до 0.8 мас. % MnO) и Al (до 0.7 мас. % Al₂O₃). В краевой части индивидов отмечается Ca-дефицитный геденбергит с содержанием Al₂O₃ (до 5.6 мас. %),



Рис. 2. Место отбора шлака: а – церковь Петра и Павла (г. Североуральск) с отсыпками черного шлака у основания здания; б – отсыпка шлака на склоне террасы; в, г – макрофото образцов шлака.

Фото М.В. Цыганко, 2025.

Fig. 2. Slag sampling place: а – Peter and Paul Church (Severouralsk) with black slag talus at the basement; б – slag talus on the slope of the terrace; в, г – macroimages of slag samples.

Photo by M.V. Tsyganko, 2025.

MgO (до 1.4 мас. %), MnO (до 0.5 мас. %) и TiO_2 (до 0.3 мас. %). Мелкие индивиды пироксена из интерстиций по составу практически полностью соответствуют геденбергиту из краевых частей крупных зерен, но в них фиксируется Na_2O (до 0.3 мас. %). В целом, геденбергит в медных шлаках уральских заводов, особенно царского периода, встречается часто. Ранее он описывался в шлаках Благодатного медеплавильного и Сысертского железоделательного заводов (Ерохин и др., 2021а, 2023).

Оливин является второстепенным минералом в шлаке, он составляет скелетные кристаллы размером до 100 мкм (рис. 3–7) в интерстициях между индивидами геденбергита. Зоны распространения оливина, покрытые сплошной сеткой скелетного агрегата, могут достигать 500 мкм. Скелетные кристаллы отвечают химическому составу фаялита (табл. 3, ан. 1–4). Оливин содержит ZnO (до 1.2 мас. %), CuO (до 1.1 мас. %), MgO (до 1.1 мас. %) и MnO (до 0.6 мас. %), но главным отличием является высокое содержание CaO (6.2–8.6 мас. %), т. е. от 11 до 15 % минала кальциооливина. Интересно, что максимальное содержание кальция проявляется в краевых зонах скелетных кристаллов оливина на границе с кирштейнитом. В целом, природный оливин обычно содержат не более 1–2 % CaO (Simkin,

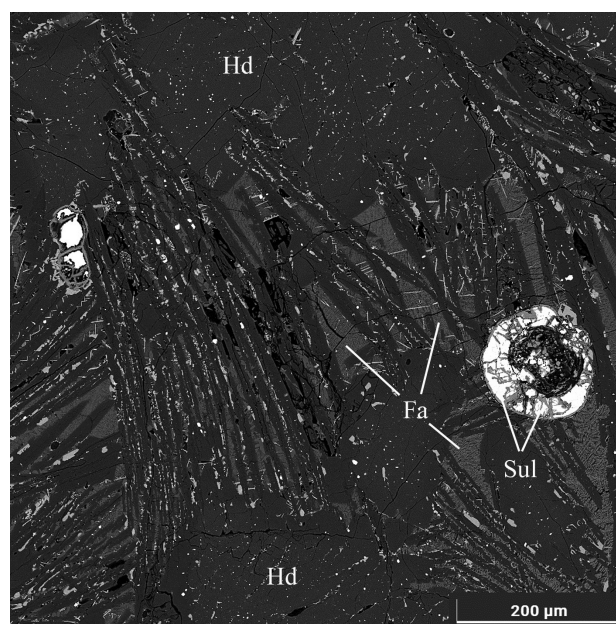


Рис. 3. Медный шлак Петропавловского завода, сложенный агрегатом пироксена и оливина с вкраплениями сульфидов.

Здесь и далее, Fa – фаялит, Hd – геденбергит, Sul – сульфиды; BSE фото.

Fig. 3. Copper slag of the Petropavlovsk plant composed of pyroxene and olivine aggregate with inclusions of sulfides.

Hereinafter, Fa – fayalite, Hd – hedenbergite, Sul – sulfides; BSE images.

Таблица 1

Химический состав шлака Петропавловского завода

Table 1

Chemical composition of slag of the Petropavlovsk plant

Оксиды	мас. %	Элементы-примеси, г/т					
SiO ₂	36.90	Li	9.36	Zr	53.90	Eu	0.81
TiO ₂	0.20	Be	1.19	Nb	1.87	Gd	2.40
Al ₂ O ₃	3.89	B	12.60	Ag	0.30	Tb	0.36
FeO _{общ}	39.68	Sc	8.48	Mo	4.70	Dy	2.08
MnO	0.64	Ti	1803.00	Cd	0.22	Ho	0.48
MgO	0.81	V	114.00	In	0.83	Er	1.34
CaO	15.33	Cr	40.20	Sn	2.85	Tm	0.19
CuO	0.84	Co	102.0	Sb	43.40	Yb	1.29
Na ₂ O	0.57	Ni	<0.100	Te	<0.30	Lu	0.19
K ₂ O	0.23	Zn	2099.00	Cs	0.43	Hf	1.63
SO ₃	0.78	Ga	7.99	Ba	303.00	Ta	0.66
ППП	0.92	As	478.00	La	13.90	W	27.60
		Se	<2.35	Ce	20.50	Pb	63.40
		Rb	8.70	Pr	2.70	Bi	0.27
		Sr	177.00	Nd	12.80	Th	1.95
		Y	17.80	Sm	2.37	U	1.80

Примечание. ППП – потери при прокаливании.

Note. PPP – loss on ignition.

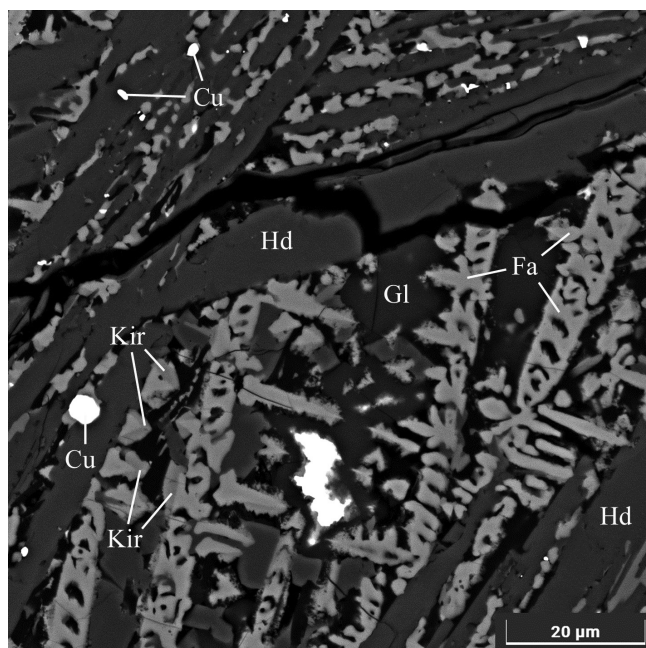


Рис. 4. Скелетный агрегат фаялита с геденбергитом, кирштейнитом (Kir), самородной медью (Cu) и стеклом (Gl) в медном шлаке.

Fig. 4. Skeletal aggregate of fayalite with hedenbergite, kirsteinite (Kir), native copper (Cu) and glass (Gl) in copper slag.

Smith, 1970), хотя в клинкерах и паралавах встречается фаялит с содержанием CaO до 5.6 мас. % (Савина и др., 2020). В шлаках встречаются еще более обогащенные кальцием фаялиты. Так, в шлаках свинцового производства был обнаружен фаялит с содержанием CaO 8.8 мас. % (Ettler et al., 2009), а в медных шлаках близ пос. Уралец (окрестности г. Нижнего Тагила) установлен оливин с содержанием CaO 9.0 мас. % (Ерохин и др., 2021б). В обоих случаях с высококальциевым фаялитом в парагенезисе всегда находился кирштейнит.

Кирштейнит образует мелкие короткопризматические индивиды в стекле или каймы на скелетных кристаллах фаялита, т. е. он образовался позднее оливина. Размер индивидов не превышает 10 мкм в длину (рис. 4). Они заметно отличаются в BSE-режиме от более светлого фаялита. Их количество составляет около 10 об. % от всей массы скелетного агрегата фаялита. По составу (табл. 3, ан. 5–7) минерал близок к эталонному кирштейниту. Он содержит небольшие количества ZnO (до 1.3 мас. %), MnO (до 0.8 мас. %) и MgO (до 0.3 мас. %). Кирштейнит является обычным минералом железоделательных/сталелитейных современных и древних шлаков (Qian et al., 2002; Eekelers et al., 2016), а также некоторых шлаков медного и свинцового производства (Ettler et al., 2009; Ерохин и др., 2021б).

Таблица 2

Химический состав геденбергита в шлаках Петропавловского завода (мас. %)

Table 2

Chemical composition of hedenbergite from slags of the Petropavlovsk plant (wt. %)

№ ан.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Эмпирические формулы, $\sum_{\text{катионов}} = 4$
1ц	48.56	–	0.66	21.48	0.76	1.59	26.95	–	Ca _{1.00} (Fe _{0.72} Ca _{0.16} Mg _{0.10} Mn _{0.03}) _{1.01} [(Si _{1.96} Al _{0.03}) _{1.99} O ₆]
1кр	43.26	0.32	5.64	26.32	0.46	1.52	22.48	–	(Ca _{0.95} Fe _{0.02}) _{1.00} (Fe _{0.87} Mg _{0.09} Mn _{0.02} Ti _{0.01}) _{0.99} [(Si _{1.75} Al _{0.26}) _{2.01} O ₆]
2ц	48.78	–	0.32	22.68	0.71	1.43	26.08	–	Ca _{1.00} (Fe _{0.77} Ca _{0.13} Mg _{0.08} Mn _{0.02}) _{1.00} [(Si _{1.98} Al _{0.02}) _{2.00} O ₆]
2кр	43.54	0.31	4.78	27.28	0.35	1.41	22.33	–	(Ca _{0.97} Fe _{0.03}) _{1.00} (Fe _{0.89} Mg _{0.09} Mn _{0.01} Ti _{0.01}) _{1.00} [(Si _{1.77} Al _{0.23}) _{2.00} O ₆]
3	43.74	0.19	4.33	27.68	0.42	1.24	22.13	0.27	(Ca _{0.96} Na _{0.02} Fe _{0.02}) _{1.00} (Fe _{0.92} Mg _{0.07} Mn _{0.01} Ti _{0.01}) _{1.01} [(Si _{1.78} Al _{0.21}) _{1.99} O ₆]
4	43.70	0.31	4.36	28.06	0.54	1.12	21.62	0.29	(Ca _{0.94} Fe _{0.04} Na _{0.02}) _{1.00} (Fe _{0.91} Mg _{0.07} Mn _{0.02} Ti _{0.01}) _{1.01} [(Si _{1.78} Al _{0.21}) _{1.99} O ₆]

Примечание. Здесь и далее в таблицах, сумма анализов равна 100 мас. %. Анализы 1, 2 – крупные индивиды пироксена, 3, 4 – небольшие индивиды среди стекла; ц – центр зерна, кр – крайняя часть.

Note. Hereinafter in Tables, the analytical total is 100 wt. %. Analyses 1, 2 – large pyroxene individuals, 3, 4 – small individuals in glass; ц – grain center, кр – margin.

Искорит – химическое соединение с формулой $\text{Fe}_2^{3+}\text{Fe}_5^{2+}\text{SiO}_{10}$, которое найдено только в шлаках железного производства, считается техногенным (Smuts et al., 1969; Rose et al., 1990) и не имеет статуса минерала, утвержденного Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации ([https://cnmnc.units.it/files/IMA_Master_List_\(2024-09\)-1.pdf](https://cnmnc.units.it/files/IMA_Master_List_(2024-09)-1.pdf)). В последнее время его встречали и в продуктах плавления свинцово-серебряных руд (Ströbele et al., 2010). В изученных шлаках фаза образует длиннопризматические и игольчатые индивиды размером до 100 мкм по удлинению и встречается в интерстициях кристаллов геденбергита и среди скелетного агрегата фаялита (рис. 5). В ассоциации с пироксеном морфология искорита призматическая, а с оливином – игольчатая, возможно, пластинчатая. В матрице фаялита иголки часто образуют ориентированный агрегат. Химический состав соединения однородный (табл. 4, ан. 1–3) и хорошо соответствует формуле $\text{Fe}_2^{3+}\text{Fe}_5^{2+}\text{SiO}_{10}$.

Магнетит является второстепенным минералом и встречается в интерстициях индивидов пироксена (рис. 5). Он образует изометричные идиоморфные кристаллы, а также их вытянутые сростки размером до 50 мкм. Не содержит включений и не имеет зональности. Химический состав минерала приведен в таблице 4 (ан. 4–6), он хорошо пересчитывается на формулу магнетита. Минерал содержит высокие концентрации Al_2O_3 (до 7.9 мас. %), что дает 17 % минала герцинита. Магнетит в медеплавильных шлаках является обычным минералом (Береговский, Кистяковский, 1971), в том числе и для медных заводов царского периода (Ерохин и др., 2021а, 2023).

Стекло присутствует в интерстициях между индивидами геденбергита во всей матрице шлака. Оно образует однородные и чистые от включений участки размером до 20–25 мкм. Химический состав стекла приведен в таблице 5. По соотношению кремнезема к щелочам стекло на диаграмме TAS для вулканитов попадает в поле ультраосновных пород, а точнее в область щелочных фойдитов на границе с щелочными базальтами. Высокощелочной состав стекла объясняется тем, что в те времена при плавке сульфидов добавляли морскую соль или так называемый «цыренный песок» (Геннин, 2022).

Сульфиды Cu и Fe рассеяны во всей матрице шлака, образуя мелкие и крупные сферулы размером до 1 см в диаметре. Почти все сферулы состоят из двух сульфидных фаз и содержат структуры

Таблица 3

Состав фаялита (1–4) и кирштейнита (5–7) в шлаках Петропавловского завода (мас. %)

Table 3

Composition of fayalite (1–4) and kirschsteinite (5–7) from slags of the Petropavlovsk plant (wt. %)

№ ан.	SiO ₂	FeO	MnO	ZnO	CuO	MgO	CaO	Эмпирические формулы, $\Sigma_{\text{катионов}} = 3$
1	30.64	57.39	0.63	0.65	1.13	1.00	8.56	(Fe _{1.57} Ca _{0.30} Mg _{0.05} Cu _{0.03} Zn _{0.02} Mn _{0.02}) _{1.99} [Si _{1.01} O ₄]
2	30.45	58.58	0.60	0.92	0.49	1.04	7.92	(Fe _{1.61} Ca _{0.28} Mg _{0.05} Zn _{0.02} Mn _{0.02} Cu _{0.01}) _{2.00} [Si _{1.00} O ₄]
3	30.28	59.56	0.40	1.17	0.56	1.01	7.02	(Fe _{1.65} Ca _{0.25} Mg _{0.05} Zn _{0.03} Mn _{0.01} Cu _{0.01}) _{2.00} [Si _{1.00} O ₄]
4	30.18	59.79	0.51	1.13	1.09	1.06	6.24	(Fe _{1.66} Ca _{0.22} Mg _{0.05} Zn _{0.03} Cu _{0.03} Mn _{0.01}) _{2.00} [Si _{1.00} O ₄]
5	32.04	37.07	0.73	0.77	–	0.26	29.13	(Ca _{0.98} Fe _{0.02}) _{1.00} (Fe _{0.95} Zn _{0.02} Mn _{0.02} Mg _{0.01}) _{1.00} [Si _{1.00} O ₄]
6	31.99	36.05	0.67	1.12	–	0.33	29.84	Ca _{1.00} (Fe _{0.94} Zn _{0.03} Mn _{0.02} Mg _{0.01}) _{1.00} [Si _{1.00} O ₄]
7	31.88	36.95	0.83	1.25	–	0.31	28.78	(Ca _{0.97} Fe _{0.03}) _{1.00} (Fe _{0.94} Zn _{0.03} Mn _{0.02} Mg _{0.01}) _{1.00} [Si _{1.00} O ₄]

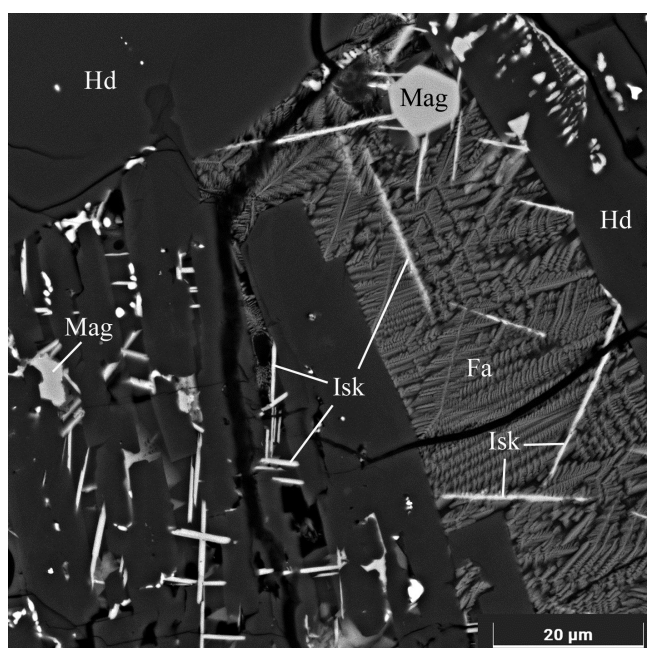


Рис. 5. Магнетит (Mgt) и искорит (Isk) среди фаялита и геденбергита в медном шлаке.

Fig. 5. Magnetite (Mgt) and iscorite (Isk) in fayalite and hedenbergite aggregate in the copper slag.

распада, хорошо видимые в BSE режиме (рис. 6, 7). Основная матрица сферул, темный в BSE режиме сульфид, имеет более железистый состав и соответствует борниту (табл. 6, ан. 1–3). Ориентированные ламели размером до 50 мкм в матрице борнита отличаются светлой окраской в BSE режиме и по составу хорошо пересчитываются на формулу дигенита Cu_9S_5 (табл. 6, ан. 4–6). К сожалению, размеры минерала не позволяют провести детальные оптические или рентгеноструктурные исследования, поэтому диагностика дигенита носит предположительный характер. Борнит является типичным суль-

фидным минералом в древних и современных медных шлаках (Wenk et al., 2019; Nasab et al., 2022). Дигенит встречается значительно реже (Ерохин и др., 2025), т. к. в медных шлаках чаще находят близкий ему по составу высокотемпературный халькозин (Artemyev, Ankushev, 2019; Nasab et al., 2022), но при этом его обнаружили и в отходах никелевого производства (Kierczak et al., 2009).

Сфалерит встречается в виде изометричных и слабо вытянутых включений размером до 10 мкм в матрице медно-железистых сульфидов на границе со сферами меди (рис. 7). Сфалерит в изученных шлаках сильножелезистый с содержанием Fe до 22 мас. % (табл. 6, ан. 7, 8). Он также содержит примесь Cu до 3.8 мас. %.

Галенит встречается в виде изометричных включений размером до 5 мкм в матрице медно-железистых сульфидов. Зерна мелкие и хаотично рассеяны в сульфидах. Небольшие примеси меди и железа в минерале, скорее всего, являются влиянием вмещающих сульфидов Cu и Fe (табл. 6, ан. 9, 10). И сфалерит, и галенит являются типичными сульфидными минералами современных медных шлаков, которые образуются в результате переплавки полиметаллических колчеданных руд (Nasab et al., 2022; Сайитов и др., 2024).

Самородная медь обычно встречается в виде мелких округлых выделений размером до 50 мкм. Нередки находки в шлаках более крупных выделений меди до 5–7 см. Обычно металл образует включения в сферах сульфидов Cu и Fe (рис. 7). В химическом составе самородной меди отмечают только Fe (до 4.8 мас. %, обычно 2.8–3.4 мас. %) и Sb (1.2–3.1 мас. %). В некоторых образцах вместо Sb фиксируется As (в 0.5–2.1 мас. %). Интересно, что подобные примеси были установлены нами в

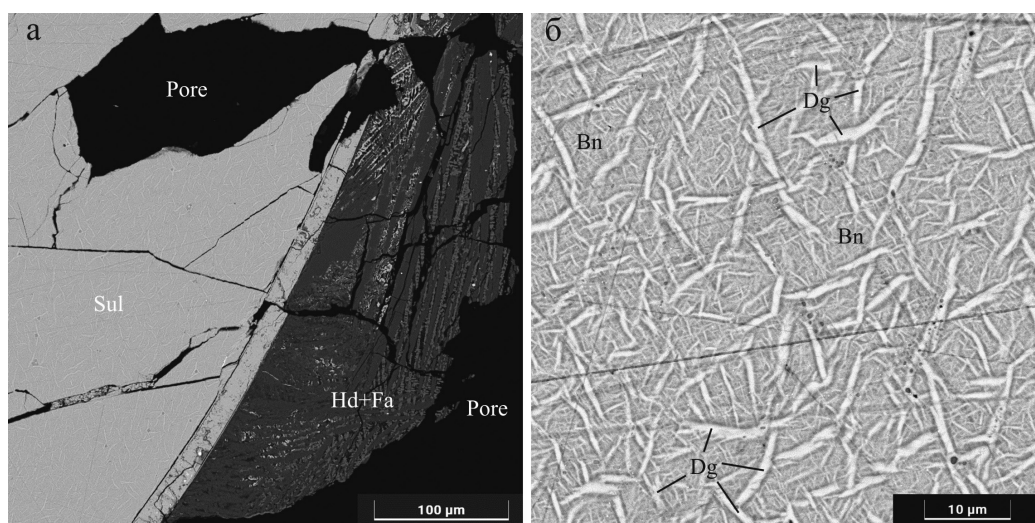


Рис. 6. Сульфиды в медном шлаке: а – контакт сульфидной сферулы с агрегатом пироксена и фаялита; б – увеличенный фрагмент матрицы сульфида.

Здесь и далее, Bn – борнит, Dg – дигенит, Pore – пустота.

Fig. 6. Sulfides in copper slag: a – contact of the sulfide spherule with pyroxene–fayalite aggregate; б – enlarged fragment of the sulfide matrix.

Hereinafter, Bn – bornite, Dg – digenite, Pore – void.

черновой меди Николае-Павдинского завода, который также принадлежал семье Походяшиных и располагался в черте современного поселка Павда (он находится значительно южнее г. Североуральска).

Из вторичных минералов в медном шлаке установлены куприт (корки на самородной меди), брошантит (скопления и пленки на сферулах сульфидов), атакамит (радиально-лучистые агрегаты в пустотах) и барит (мелкие скопления в ассоциации с брошантитом). Последний минерал свидетельствует о том, что в шлаках разлагаются не только сульфиды, но и алюмосиликатная часть (в первую очередь, стекло).

Оценить количество шлаков, оставшихся в результате работы Петропавловского завода, не представляется возможным. На данный момент видно, что на месте бывшего предприятия шлакоотвала нет, остаются только его небольшие фрагменты. Видимо за 200 лет прошедшие с момента остановки завода шлакоотвал был израсходован на нужды городского хозяйства (отсыпка дорог, ям, фундаментов и т. д.) или вывезен куда-то.

В целом, результаты химического, микроэлементного и минерального состава шлаков Петропавловского завода позволяют отнести их к шлакам медеплавильного производства, который

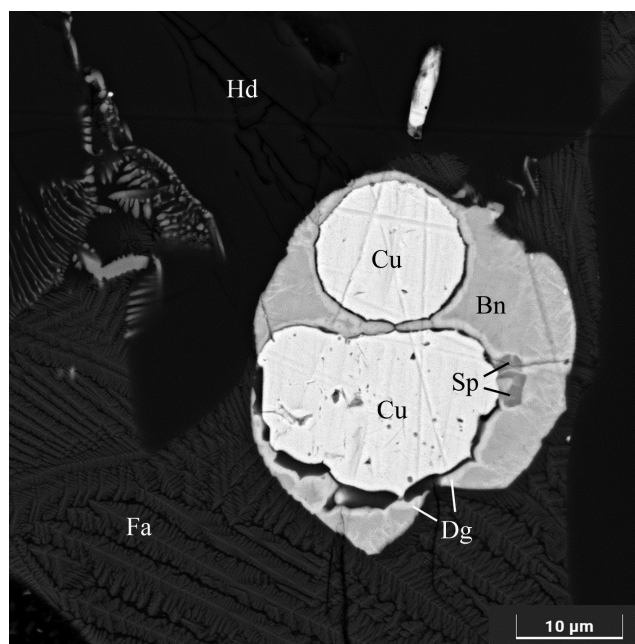


Рис. 7. Самородная медь в оторочке борнита, сфалерита (Sp) и дигенита в агрегате фаялита и геденбергита в медном шлаке.

Fig. 7. Native copper (Cu) rimmed by bornite, sphalerite (Sp) and digenite in the fayalite–hedenbergite aggregate of the copper slag.

Таблица 4

Состав искорита (1–3) и магнетита (4–6) в шлаках Петропавловского завода (мас. %)

Table 4

Composition of iscorite (1–3) and magnetite (4–6) in slags of the Petropavlovsk plant (wt. %)

№ ан.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	FeO	MnO	ZnO	CaO	Эмпирические формулы, $\Sigma_{\text{катионов}} = 8$ (искорит) и 3 (магнетит)
1	10.16	0.14	1.94	–	24.78	60.15	0.88	1.64	0.31	(Fe ³⁺ _{1.78} Al _{0.22}) _{2.00} (Fe _{4.80} Zn _{0.12} Mn _{0.07} Ca _{0.03}) _{5.02} (Si _{0.97} Ti _{0.01}) _{0.98} O ₁₀
2	10.82	0.05	2.09	–	24.66	58.77	1.42	1.94	0.25	(Fe ³⁺ _{1.77} Al _{0.23}) _{2.00} (Fe _{4.68} Zn _{0.14} Mn _{0.12} Ca _{0.03}) _{4.97} Si _{1.03} O ₁₀
3	10.37	0.16	1.74	–	25.11	59.74	1.09	1.51	0.28	(Fe ³⁺ _{1.80} Al _{0.20}) _{2.00} (Fe _{4.77} Zn _{0.11} Mn _{0.09} Ca _{0.03}) _{5.00} (Si _{0.99} Ti _{0.01}) _{1.00} O ₁₀
4	0.43	2.15	6.02	0.50	58.59	31.53	–	0.78	–	(Fe _{0.98} Zn _{0.02}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{1.64} Al _{0.26} Ti _{0.06} V _{0.02} Si _{0.02}) _{2.00} O ₄
5	0.38	2.16	7.06	0.74	57.41	31.58	–	0.67	–	(Fe _{0.98} Zn _{0.02}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{1.60} Al _{0.31} Ti _{0.06} V _{0.02} Si _{0.01}) _{2.00} O ₄
6	0.55	2.53	7.92	0.95	55.79	31.67	–	0.59	–	(Fe _{0.98} Zn _{0.02}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{1.54} Al _{0.34} Ti _{0.07} V _{0.03} Si _{0.02}) _{2.00} O ₄

Примечание. * – рассчитано по стехиометрии.

Note. * – calculated by stoichiometry.

и осуществлялся на этом заводе. Для плавки, по всей видимости, использовались халькопиритовые руды, которые добывались на Турьинских рудниках и были обогащены сфалеритом (Овчинников, 1948). Руды также содержали сурьмянисто-мышьяковые минералы (блеклые руды, стибнит, мышьяк, герсдорфит и др.), характерные для Турьинских рудников (Федоров, Никитин, 1901).

Определенный интерес представляет содержание Ag в изученных шлаках. Оно было установлено в черновой меди Петропавловского завода в Екатеринбургской лаборатории в количестве около 30 грамм в 16.4 кг (7 золотников серебра на пуд меди). Позднее оказалось, что содержание Ag обычно не превышает 2.75 золотника на пуд меди (11.8 гр в 16.4 кг). Один раз две тыс. пудов меди с содержанием Ag в 5 золотников вывезли для очистки на Колывано-Воскресенский медеплавильный завод на Алтае. За исключением данного факта о промышленном извлечении Ag из петропавловской меди ничего неизвестно (Курлаев, 2017). Наши геохимические и минералогические данные показывают полное отсутствие Ag в шлаках. Вероятнее всего, серебро на Турьинских рудниках встречалось редкими «кустами» и богатые скопления были приурочены только к зоне окисления (Федоров, Никитин, 1901). Вполне возможно, что такие серебряносодержащие медные руды плавил особыми партиями и отходы этих плавок складировались отдельно от обычных шлаков, поэтому они не попали в нашу выборку.

ВЫВОДЫ

Впервые изучена минералогия медных шлаков Петропавловского завода, который выплавлял медь в период с 1761 по 1822 гг. Установлено, что медные шлаки сложены фаялит-геденбергитовым агрегатом с присутствием искорита, магнетита, стекла, металлической меди, борнита, дигенита (?), сфалерита и галенита. Вторичная минерализация представлена купритом, брошантитом, баритом и атакамитом. Изученные шлаки образовались в результате переработки халькопиритовых руд с примесью сфалерита, которые добывались на близлежащих Турьинских рудниках и других мелких рудопрооявлениях, расположенных в окрестностях современного г. Североуральска.

Таблица 5

Состав стекла в шлаках Петропавловского завода (мас. %)

Table 5

Composition of glass in slags of the Petropavlovsk plant (wt. %)

№ ан.	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	BaO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
1	0.30	1.19	41.52	10.14	27.76	0.74	0.77	9.68	3.08	4.82
2	0.53	1.30	42.02	11.68	26.97	0.60	1.47	7.20	3.43	4.80
3	0.37	0.75	41.60	11.15	25.53	0.63	1.20	10.50	3.90	4.37
4	0.35	1.25	42.39	10.34	26.55	0.71	0.93	9.77	3.45	4.26
5	0.42	1.24	41.54	10.20	28.06	0.85	0.67	9.69	3.24	4.09
6	0.27	1.37	41.07	9.89	27.64	0.75	0.73	9.46	3.81	5.01

Таблица 6

Химический состав сульфидов в шлаках Петропавловского завода (мас. %)

Table 6

Chemical composition of sulfides from slags of the Petropavlovsk plant (wt. %)

№ ан.	Fe	S	Cu	Zn	Pb	Формулы
Борнит						
1	11.65	25.66	62.69	—	—	Cu _{4.94} Fe _{1.05} S _{4.01}
2	10.67	25.75	63.58	—	—	Cu _{5.02} Fe _{0.96} S _{4.02}
3	11.38	25.49	63.13	—	—	Cu _{4.99} Fe _{1.02} S _{3.99}
Дигенит (?)						
4	3.71	21.22	75.07	—	—	(Cu _{8.66} Fe _{0.49}) _{9.15} S _{4.85}
5	5.01	22.23	72.76	—	—	(Cu _{8.32} Fe _{0.65}) _{8.97} S _{5.03}
6	5.31	22.28	72.41	—	—	(Cu _{8.27} Fe _{0.69}) _{8.96} S _{5.04}
Сфалерит						
7	21.97	34.32	3.37	40.34	—	(Zn _{0.58} Fe _{0.37} Cu _{0.05}) _{1.00} S _{1.00}
8	18.06	34.10	3.77	44.07	—	(Zn _{0.64} Fe _{0.30} Cu _{0.06}) _{1.00} S _{1.00}
Галенит						
9	1.43	14.27	2.94	—	81.36	(Pb _{0.86} Cu _{0.10} Fe _{0.06}) _{1.02} S _{0.98}
10	2.06	14.38	3.17	—	80.39	(Pb _{0.84} Cu _{0.11} Fe _{0.08}) _{1.03} S _{0.97}

Примечание. Формулы сульфидов рассчитаны на общее количество формульных единиц: 10 – борнит, 14 – дигенит (?), 2 – сфалерит и галенит.

Note. Formulas of sulfides are recalculated to atom sums: 10 for bornite, 14 for digenite (?) and 2 for sphalerite and galena.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев В.В. (2001) Металлургические заводы Урала XVII–XX вв. Энциклопедия. Екатеринбург, Академкнига, 536 с.
- Аверина Н.Ф. (2015) Пермские книжники. Пермь, Пушка, 304 с.
- Береговский В.И., Кистяковский Б.Б. (1971) Металлургия меди и никеля. М., Металлургия, 456 с.
- Геннин В.И. (2022) Описание уральских и сибирских заводов. Екатеринбург, ООО Грачёв и партнёры, 491 с.
- Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. (2021a) Шлаки Благодатного медеплавильного завода (состав и геоэкология). *Известия вузов. Горный журнал*, (5), 75–86. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-5-75-86>
- Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Фаррахова Н.Н. (2025) Минералогия медных шлаков из Уктусского металлургического завода. *Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*, (1), 80–87. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-80-87>
- Ерохин Ю.В., Кропанцев С.Ю., Леонова Л.В. (2021b) О находке фаялитового шлака в отложениях ручья Малая Бобровка (окрестности посёлка Уралец). *Минералогия техногенеза*, (22). Миасс, ИМин УрО РАН, 82–91.

- Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., Леонова Л.В. (2023) Минералогия медных шлаков Сысертского железоделательного завода, Средний Урал. *Минералогия*, 9(2), 30–40. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-2-3>
- Курлаев Е.А. (2017) Уральское серебро. *Известия вузов. Горный журнал*, (5), 102–106.
- Овчинников Л.Н. (1948) Руды Турьинских скарных месторождений меди. *Труды Горно-геологического института*, (15), 1–118.
- Сабанова М.Н., Орехова Н.Н. (2017) Перспективы применения флотации для переработки экологически опасных лежалых шлаков медной плавки. *Горный ин-формационно-аналитический бюллетень*, (2), 336–343.
- Савина Е.А., Перетяжко И.С., Хромова Е.А., Глушкова В.Е. (2020) Плавленные породы (клинкеры и паралавы) пирометаморфического комплекса Хамарин-Хурал-Хид, Восточная Монголия: минералогия, геохимия, процессы образования. *Петрология*, 28(5), 482–510. <https://doi.org/10.31857/S0869590320050052>
- Сайитов С.С., Цой В.Д., Расулов Ш.М., Печерский Р.Д., Расулова А.В., Абдуваитов А.К., Асроров А.А. (2024) Вещественный состав медных шлаков Алмалыкского медеплавильного завода (Узбекистан). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 335(4), 148–158. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4292>.
- Сысуев Ю.Н. (2019) Город на Вагране: очерки истории Североуральска. Североуральск, 231 с.
- Федоров Е.С., Никитин В.В. (1901) Богословский горный округ. Описание в отношении его топографии, минералогии, геологии и рудных месторождений. СПб, Типография М. Стасюлевича, 476 с.
- Artemyev D.A., Ankushev M.N. (2019). Trace elements of Cu-(Fe)-sulfide inclusions in Bronze Age copper slags from South Urals and Kazakhstan: ore sources and alloying additions. *Minerals*, 9, 746. <https://doi.org/10.3390/min9120746>
- Artemyev D.A., Ankushev M.N., Blinov I.A., Kotlyarov V.A., Lukpanova Ya.A. (2018) Mineralogy and origin of slags from the 6th kurgan of the Taksay 1 burial complex, Western Kazakhstan. *The Canadian Mineralogist*, 56, 883–904. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800025>
- Eekelers K., Degryse P., Muchez P. (2016) Petrographic investigation of smithing slag of the Hellenistic to Byzantine city of Sagalassos (SW-Turkey). *American Mineralogist*, 101, 1072–1083. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5390>
- Ettler V., Johan Z., Kribek B., Šebek O., Mihaljevič R. (2009) Mineralogy and environmental stability of slags from the Tsumeb smelter, Namibia. *Applied Geochemistry*, 24, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.10.003>
- Kierczak J., Neel C., Puziewicz J., Brill H. (2009) The mineralogy and weathering of slag produced by the smelting of lateritic Ni ores, Szklary, Southwestern Poland. *The Canadian Mineralogist*, 47(3), 557–572. <https://doi.org/10.3749/canmin.47.3.557>
- Lohmeier S., Lottermoser B.G., Schirmer T., Gallhofer D. (2021) Copper slag as a potential source of critical elements – a case study from Tsumeb, Namibia. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121, 129–142. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1383/2021>
- Nasab M.S., Bafti S.B., Yarahmadi M.R., Maymand M.M., Khorasani K.J. (2022) Mineralogical properties of the copper slags from the Sar Cheshmeh smelter plant, Iran. *Minerals*, 12, 1153. <https://doi.org/10.3390/min12091153>
- Pekov I.V., Chukanov N.V., Zadov A.E., Voudouris P., Magganis A., Katerinopoulos A. (2011) Agardite-(Nd) NdCu₆(AsO₄)₃(OH)₆ · 3H₂O from the Hilarion Mine, Lavrion, Greece: mineral description and chemical relations with other members of the agardite-zálesiite solid-solution system. *Journal of Geosciences*, 56(3), 249–255. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.099>
- Qian G., Sun D.D., Tay J.H., Lai Z., Xu G. (2002) Autoclave properties of kirschsteinite-based steel slag. *Cement and Concrete Research*, 32(9), 1377–1382. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00790-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00790-1)
- Rose D., Endlicher G., Mücke A. (1990) The occurrence of iscorite in Medieval iron slags. *Historical Metallurgy*, 24, 27–32.
- Sanchez M., Sudbury M. (2013) Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management. *Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy*, 49, 161–168. <https://doi.org/10.2298/JMMB120814011S>
- Simkin T., Smith J.V. (1970) Minor-element distribution in olivine. *Journal of Geology*, 78, 304–325.
- Smuts J., Steyn J.G.D., Boeyens J.C.A. (1969) Crystal structure of an iron silicate, iscorite. *Acta Crystallographica*, B25, 1251–1255.
- Ströbele F., Wenzel T., Kronz A., Hildebrandt L.H., Markl G. (2010) Mineralogical and geochemical characterization of high-medieval lead-silver smelting slags from Wiesloch near Heidelberg (Germany) – an approach to process reconstruction. *Archaeology Anthropology Sciences*, 2, 191–215. <https://doi.org/10.1007/s12520-010-0039-7>
- Wenk H.-R., Yu R., Tamura N., Bischoff D., Hunkeler W. (2019) Slags as evidence for copper mining above Casaccia, Val Bregaglia (Central Alps). *Minerals*, 9, 292. <https://doi.org/10.3390/min9050292>

REFERENCES

Alekseev V.V. (2001) *Metallurgical plants of the Urals. XVII–XX centuries. Encyclopedia*. Yekaterinburg, Akademkniga, 536 p. (in Russian)

Artemyev D.A., Ankushev M.N. (2019). Trace elements of Cu-(Fe)-sulfide inclusions in Bronze Age copper slags from South Urals and Kazakhstan: ore sources and

alloying additions. *Minerals*, 9, 746. <https://doi.org/10.3390/min9120746>

Artemyev D.A., Ankushev M.N., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. Lukpanova Ya.A. (2018) Mineralogy and origin of slags from the 6th kurgan of the Taksay 1 burial complex, Western Kazakhstan. *Canadian Mineralogist*, 56, 883–904. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800025>

Averina N.F. (2015) *Perm scribes*. Perm, Pushka, 304 p. (in Russian)

Beregovsky V.I., Kistyakovsky B.B. (1971) *Metallurgy of copper and nickel*. M., Metallurgiya, 456 p. (in Russian)

Eekelers K., Degryse P., Muchez P. (2016) Petrographic investigation of smithing slag of the Hellenistic to Byzantine city of Sagalassos (SW-Turkey). *American Mineralogist*, 101, 1072–1083. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5390>

Erokhin Yu.V., Kropantsev S.Yu., Leonova L.V. (2021b) Finding of the fayalite slag in deposits of the Malaya Bobrovka Creek (near the settlement of Uralets). *Mineralogiya tekhnogeneza (Mineralogy of Technogenesis)*, (22). Miass, IMin UrO RAN, 82–91. (in Russian)

Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V., Leonova L.V. (2023) Mineralogy of copper slags of the Sysert ironworks, Central Urals. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 9(2), 30–40. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-2-3> (in Russian)

Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V. (2021a) Slags of the Blagodatny copper smelter (composition and geoecology). *Izvestiya VUZov. Gornyy zhurnal (News of the Higher Institutions. Mining Journal)*, (5), 75–86. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-5-75-86> (in Russian)

Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Shiryayev P.B., Farrakhova N.N. (2025) Mineralogy of copper slag from the Uktus metallurgical plant. *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennyye nauki (Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences)*, (1), 80–87. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-80-87> (in Russian)

Ettler V., Johan Z., Kribek B., Šebek O., Mihaljevič R. (2009) Mineralogy and environmental stability of slags from the Tsumeb smelter, Namibia. *Applied Geochemistry*, 24, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.10.003>

Fedorov E.S., Nikitin V.V. (1901) *Bogoslovsky mining district. Description of its topography, mineralogy, geology and ore deposits*. St. Petersburg, Tipografiya M. Stasyulevicha, 476 p. (in Russian)

Gennin V.I. (2022). *Description of the Urals and Siberian plants*. Yekaterinburg, Grachev i partnery, 491 p. (in Russian)

Kierczak J., Neel C., Puziewicz J., Brill H. (2009) The mineralogy and weathering of slag produced by the smelting of lateritic Ni ores, Szklary, Southwestern Poland. *The Canadian Mineralogist*, 47(3), 557–572. <https://doi.org/10.3749/canmin.47.3.557>

Kurlaev E.A. (2017) Urals silver. *Izvestiya VUZov. Gornyy zhurnal (News of the Higher Institutions. Mining Journal)*. (5), 102–106. (in Russian)

Lohmeier S., Lottermoser B.G., Schirmer T., Gallhofer D. (2021) Copper slag as a potential source of critical elements – a case study from Tsumeb, Namibia. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121, 129–142. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1383/2021>

Nasab M.S., Bafti S.B., Yarahmadi M.R., Maymand M.M., Khorasani K.J. (2022) Mineralogical properties of the copper slags from the Sar Cheshmeh smelter plant, Iran. *Minerals*, 12, 1153. <https://doi.org/10.3390/min12091153>

Ovchinnikov L.N. (1948) Ores of the Tur'ya copper skarn deposits. *Trudy Gorno-geologicheskogo instituta (Proceedings of the Mining and Geology Institute)*, (15), 1–118. (in Russian)

Pekov I.V., Chukanov N.V., Zadov A.E., Voudouris P., Magganis A., Katerinopoulos A. (2011) Agardite-(Nd) $\text{NdCu}_6(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ from the Hilarion Mine, Lavrion, Greece: mineral description and chemical relations with other members of the agardite-zálesiite solid-solution system. *Journal of Geosciences*, 56(3), 249–255. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.099>

Qian G., Sun D.D., Tay J.H., Lai Z., Xu G. (2002) Autoclave properties of kirschsteinite-based steel slag. *Cement and Concrete Research*, 32(9), 1377–1382. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00790-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00790-1)

Rose D., Endlicher G., Mücke A. (1990) The occurrence of iscorite in Medieval iron slags. *Historical Metallurgy*, 24, 27–32.

Sabanova M.N., Orekhova N.N. (2017) Prospects of application of flotation for processing the ecologically dangerous stale copper smelting slags. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (Mining Information and Analytical Bulletin)*, (2), 336–343. (in Russian)

Sanchez M., Sudbury M. (2013) Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management. *Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy*, 49, 161–168. <https://doi.org/10.2298/JMMB120814011S>

Savina E.A., Peretyazhko I.S., Khromova E.A., Glushkova V.E. (2020) Melted rocks (clinkers and paralavas) from the Khamaryn-Khural-Khiid combustion metamorphic complex in Eastern Mongolia: mineralogy, geochemistry and genesis. *Petrology*, 28(5), 431–457. <https://doi.org/10.1134/S0869591120050057>

Sayitov S.S., Tsoi V.D., Rasulov Sh.M., Pechersky R.D., Rasulova A.V., Abduvaitov A.K., Asrorov A.A. Mineral 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)*. 335(4), 148–158. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4292>. (in Russian)

Simkin T., Smith J.V. (1970) Minor-element distribution in olivine. *Journal of Geology*, 78, 304–325.

Smuts J., Steyn J.G.D., Boeyens J.C.A. (1969) Crystal structure of an iron silicate, iscorite. *Acta Crystallographica*, B25, 1251–1255.

Ströbele F., Wenzel T., Kronz A., Hildebrandt L.H., Markl G. (2010) Mineralogical and geochemical characterization of high-medieval lead-silver smelting slags from Wiesloch near Heidelberg (Germany) – an approach to process reconstruction. *Archaeology Anthropology Sciences*, 2, 191–215. <https://doi.org/10.1007/s12520-010-0039-7>

Sysuev Yu.N. (2019) Town on Vagran: essays on the history of Severouralsk. Severouralsk, 231 p. (in Russian)

Wenk H.-R., Yu R., Tamura N., Bischoff D., Hunkeler W. (2019) Slags as evidence for copper mining above Casaccia, Val Bregaglia (Central Alps). *Minerals*, 9, 292. <https://doi.org/10.3390/min9050292>

Информация об авторах

Ерохин Юрий Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; erokhin-yu@yandex.ru

Цыганко Михаил Владимирович – директор Минералогического музея «Штуфной кабинет», г. Североуральск, Россия; zigankom@mail.ru

Хиллер Вера Витальевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; hilvervit@mail.ru

Ширяев Павел Борисович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; pavel.shiryayev@gmail.com

Фаррахова Надежда Николаевна – научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; farrakhova@igg.uran.ru

Information of the authors

Yuri V. Erokhin – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia; erokhin-yu@yandex.ru

Mikhail V. Tsyganko – Director of the Mineralogical Museum «Shtufnoi Kabinet», Severouralsk, Russia; zigankom@mail.ru

Vera V. Khiller – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia; hilvervit@mail.ru

Pavel B. Shiryayev – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia; pavel.shiryayev@gmail.com

Nadezhda N. Farrakhova – Scientific Researcher, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia; farrakhova@igg.uran.ru