



Минералогия медных шлаков Кировградского завода (Свердловская область)

Ю. В. Ерохин, В. С. Пономарев, А. В. Захаров, Л. В. Леонова

Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия
erokhin-yu@yandex.ru

Объектом настоящего изучения стали медные шлаки Кировградского (первоначально Калатинского) завода, действующего с 1914 г., вокруг которого постепенно вырос современный Кировград (Свердловская область, Средний Урал). Вещественный состав исследованных образцов получен методами сканирующей электронной микроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Установлено, что они представлены двумя типами, отличающимися друг от друга минералого-геохимическими характеристиками. Первый тип шлаков сложен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, хромита и арсенидно-стибнидно-сульфидной минерализации, а также меди и серебра. Халькогениды представлены троилитом, кубанитом, хейкокитом, рудашевскитом, галенитом, брейтгауптитом, вестервельдитом и сульфидами Cu-Fe. Второй тип представлен фаялит-геденбергитовым агрегатом со значительным присутствием магнетита, стекла и арсенидно-стибнидно-сульфидной минерализации, а также барковита, меди и серебра. Халькогениды представлены борнитом, халькозином, сфалеритом, галенитом, пентландитом, хизлевудитом, брейтгауптитом, никелином и шандитом. Минералогия шлаков хорошо согласуется с их микроэлементным составом. Возможно, что шлаки первого типа получились в результате переплавки медноколчеданных руд Левихинской группы месторождений, а второго типа – полиметаллических руд Сафьяновского месторождения. Шлаки Кировградского завода можно переработать с выделением сульфидного и магнетитового концентратов и попутного серебра.

Ключевые слова: фаялит, пироксены, сульфиды, минералогия, геохимия, медные шлаки, Кировградский медеплавильный завод

The mineralogy of copper slags the Kirovgrad plant (Sverdlovsk region)

Yu. V. Erokhin, V. S. Ponomarev, A. V. Zakharov, L. V. Leonova

Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia

The object of this study is the copper slag from the Kirovgrad (originally Kalatinsky) plant, operating since 1914, around which the modern city of Kirovgrad (Sverdlovsk region, Middle Urals) has gradually grown. The material composition of the studied samples is obtained by scanning electron microscopy and inductively coupled plasma mass spectrometry. It has been established that they are represented by two types with distinct mineralogical and geochemical characteristics. The first type is composed of a fayalite-augite aggregate containing magnetite, chromite, and arsenide-stibnide-sulfide mineralization, as well as copper and silver. Chalcogenides are represented by troilite, cubanite, haycockite, rudashevskite, galena, breithauptite, westerveldite, and Cu-Fe sulfides. The second type is a fayalite-hedenbergite aggregate with significant amounts of magnetite, glass, and arsenide-stibnide-sulfide mineralization, as well as barkovite, copper, and silver. Chalcogenides are represented by bornite, chalcocite, sphalerite, galena, pentlandite, heazlewoodite, breithauptite, nickeline, and shandite. The slag mineralogy is consistent with their trace element composition. It is concluded that the first type of slag resulted from the smelting of copper pyrite ores from the Levikhinsky group of deposits, while the second type resulted from the smelting of poly-metallic ores from the Safyanovsky deposit. Slags from the Kirovgrad plant can be processed to extract sulphide and magnetite concentrates, and associated silver.

Keywords: fayalite, pyroxenes, sulphides, mineralogy, geochemistry, copper slags, Kirovgrad copper plant

Введение

Изучение медных шлаков представляет собой актуальную научно-практическую задачу, обладающую значимостью в двух ключевых аспектах: экологическом и ресурсно-промышленном. Это обусловлено тем, что значительная часть шлаков характеризуется повышенным содержанием ценных компонентов и мо-

жет рассматриваться в качестве техногенного минерального сырья. В процессе пирометаллургической переплавки медно-сульфидных руд с получением черновой меди неизбежно образуется существенный объём металлургического шлака. По литературным данным (Sanchez, Sudbury, 2013), на современных медеплавильных производствах мира удельный выход

Для цитирования: Ерохин Ю. В., Пономарев В. С., Захаров А. В., Леонова Л. В. Минералогия медных шлаков Кировградского завода (Свердловская область) // Вестник геонаук. 2026. 1(373). С. 22–31. DOI: 10.19110/geov.2026.1.3

For citation: Erokhin Yu. V., Ponomarev V. S., Zakharov A. V., Leonova L. V. The mineralogy of copper slags the Kirovgrad plant (Sverdlovsk region). Vestnik of Geosciences, 2026, 1(373), pp. 22–31, doi: 10.19110/geov.2026.1.3



шлака варьирует в диапазоне от 2 до 5 тонн на одну тонну получаемой черновой меди в зависимости от применяемой технологической схемы. Из-за этого по всему миру накоплены гигантские объемы медных шлаков, в том числе и в Уральском регионе, который несколько столетий являлся одним из главных металлургических центров сначала Российской империи, затем Советского Союза, а теперь и современной России. Современные научные исследования в области минералогии и вещественного состава медных шлаков сосредоточены преимущественно на анализе отходов действующих медеплавильных предприятий. Причиной этому является то, что с последними связаны большие экологические проблемы и на них накоплены колоссальные объемы шлака. Причем эти отходы кроме меди содержат и другие ценные компоненты, а также металлы, в том числе и благородные (Chun et al., 2015; Nasab et al., 2022; Ерохин и др., 2025 и мн. др.). Полученные в ходе детальных минералого-геохимических исследований результаты создают научную основу для разработки технологий вторичной переработки медных шлаков. Внедрение таких данных в производстве позволяет вовлекать в хозяйственный оборот медные шлаки, снижать антропогенную нагрузку на экосистемы и оптимизировать использование минерально-сырьевой базы.

Калатинский (ныне Кировградский) медеплавильный завод был основан в 1914 г. и назван по расположенному рядом поселку Калата. Он успел поработать с 1914 по 1917 г. и был закрыт в связи с революционными событиями и последующей национализацией предприятия. С 1922 г. завод возобновил свою деятельность. В 1935 г. город Калата (в 1932 г. быстро растущий поселок стал городом) был переименован в г. Кировград. В годы Великой Отечественной войны завод продолжал работать и выпускал продукцию военного назначения. В послевоенные годы модернизировался и постепенно расширял свою работу (стал дополнительно выплавлять бронзу, цинк и свинец). В 1957 г. завод был преобразован в комбинат за счет объединения горного, металлургического и химического производств. В девяностые годы предприятие стало стагнировать и сокращать выпуск продукции. Развал комбината был предотвращен за счет вхождения в структуру Уральской горно-металлургической компании (Металлургические..., 2001). На данный момент Кировградский комбинат активно работает и имеет постоянно растущие отвалы металлургических шлаков и пиритных огарков. Область техногенного влияния предприятия распространяется на сам Кировград и его восточные и южные окраины.

Цель настоящего исследования — изучение минералогии медных шлаков Кировградского завода для их использования в дальнейшем металлургическом перепеделе.

Пробоотбор и методы исследования

Металлургический завод находится на юго-восточной окраине г. Кировграда. Шлаки складываются непосредственно около восточной части завода на заболоченной территории. Шлакоотвал имеет 630 × 690 м в ширину (на спутниковых снимках характеризуется округлой формой) и около 60–70 м в высоту. Кроме то-

го, шлаки встречаются на всей территории заводоуправления и ими укреплены стенки крупного хвостохранилища, расположенного на южной окраине города. На самой территории города шлак является вполне обычным техногенным мусором, что, возможно, стало следствием отсыпки дорожного полотна.

Мы отобрали пробы шлака и штейна в северной части шлакоотвала (отбор проб производился у основания отвала), а также в северной части шламоохранилища недалеко от автодороги Кировград — Верхний Тагил. Шлаки однородные, черного или темно-серого цвета, обычно с красноватой патиной на поверхности. Их размер варьирует от первых см до 1 м. Пористость достаточно низкая, не более 5–10 об. %. Некоторые шлаки покрыты зелеными пленками вторичной медной минерализации. Всего нами отобрано около 100 образцов, из которых было выбрано 5 наиболее типовых для детального изучения.

Химический состав минералов и фотографии в режиме BSE (обратнорассеянных электронов) сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments и программным обеспечением AZtecOne с ускоряющим напряжением 20 кВ и временем экспозиции 5 мс на пиксель. Анализ проводился с полированных шлифов с углеродным напылением (аналитик Л. В. Леонова). Микроэлементный состав шлака был определен методом ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7700X и методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе AAnalyst 400 (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, аналитик К. А. Филиппова). Кристаллохимический пересчет минералов производился катионным методом (на количество катионов в минерале), а содержание окисного железа рассчитывалось согласно стехиометрии минерала.

Результаты исследования

В результате проведенных исследований оказалось, что отобранные нами медные шлаки визуально однородные и их можно разделить на два типа по крупности зерен — тонко- и мелкозернистые, крупно- и гигантозернистые. Изучение микроэлементного (геохимического) состава этих двух типов показало их существенные различия (табл. 1). Первый тип шлаков (тонко- и мелкозернистого строения) характеризуется условно «базитовым» геохимическим трендом — более высокими концентрациями титана, ванадия, хрома, бария, стронция, молибдена и РЗЭ. Второй тип (крупно- и гигантозернистые шлаки) отличается условно «гипербазитовым» трендом — повышенными количествами хрома, кобальта, никеля и низкими содержаниями РЗЭ. Для этого же типа характерны anomalously высокие содержания цинка, свинца и олова.

Минералогия первого типа медных шлаков представлена 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 0.2–0.3 мм в длину в виде структуры «спинифекс» (рис. 1). По данным химического состава минерал относится к фаялиту и имеет зональность: в центре он более магниезильный, а по краям — железистый

Таблица 1. Микроэлементный состав шлаков Кировградского завода (в г/т)

Table 1. Microelement composition of slags from the Kirovgrad plant (in ppm)

Элементы Elements	KB3-1	KB3-4	Элементы Elements	KB3-1	KB3-4	Элементы Elements	KB3-1	KB3-4
Li	20.60	7.44	Zr	76.60	80.40	Eu	3.14	1.38
Be	3.15	3.48	Nb	4.02	2.01	Gd	2.55	1.07
Cs	2.10	0.64	Ag	13.20	21.80	Tb	0.39	0.16
Sc	7.08	2.66	Mo	339.0	80.00	Dy	2.30	1.16
Ti	1677.0	822.0	Cd	2.77	<0.22	Ho	0.50	0.21
V	78.60	29.80	In	8.18	78.3	Er	1.49	0.63
Cr	515.0	387.0	Sn	138.0	6193.0	Tm	0.21	0.09
Co	125.0	570.0	Sb	164.0	1795.0	Yb	1.38	0.59
Ni	32.90	1583.0	Te	0.55	0.57	Lu	0.22	0.09
Zn	30600	66077	Ta	0.40	0.24	Hf	2.25	2.23
Ga	71.10	13.80	Ba	8711.0	3728.0	Tl	2.06	2.57
As	637.0	1066.0	La	16.00	4.93	W	34.80	20.40
Se	3.49	<2.35	Ce	33.00	13.00	Pb	1300.0	22696
Rb	21.90	9.16	Pr	3.26	1.37	Bi	1.11	1.11
Sr	623.0	179.0	Nd	13.90	5.92	Th	3.55	1.50
Y	13.70	5.27	Sm	2.71	1.23	U	6.43	1.63

Примечание: обр. KB3-1 — тонкозернистый шлак, обр. KB3-4 — крупнозернистый шлак.

Note: sample KB3-1 — fine-grained slag, sample KB3-4 — coarse-grained slag.

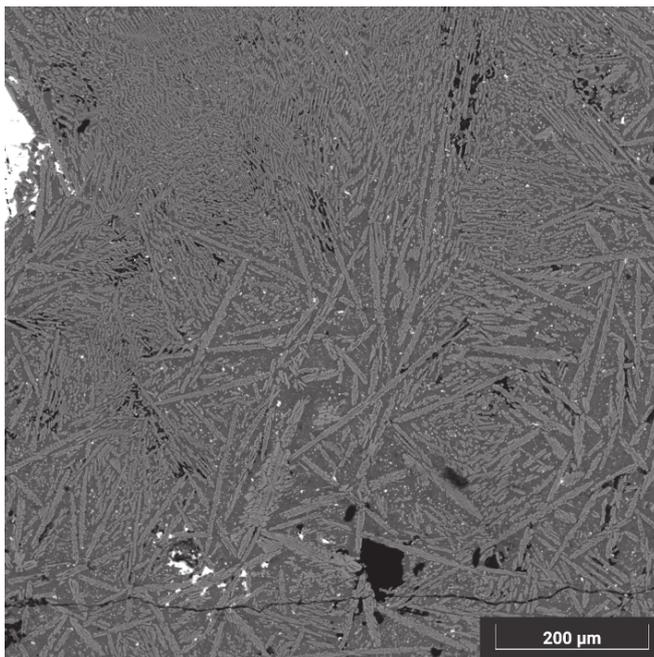


Рис. 1. Внешний вид кировградского шлака первого типа с призматическими кристаллами фаялита. Здесь и далее — BSE-фото, TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 1. Appearance of Kirovgrad slag of the first type with prismatic crystals of fayalite. From here on — BSE photo, TESCAN MIRA LMS, S6123

(см. табл. 2, ан. 1–2). По данным кристаллохимического пересчета, оливин является феррогортонолитом, только центральные зоны содержат до 12 % минала форстерита, а краевые — не более 6.5 %. Кроме магнезия фаялит содержит и другие примеси — ZnO (до 3.9 мас. %), CaO (до 1.4 мас. %), MnO (до 1.3 мас. %) и Al₂O₃ (до 0.5 мас. %). Причем глинозем проявлен только в краевых зонах индивидов оливина.

Авгит ((Ca,Mg,Fe,Al)₂[(Si,Al)₂O₆]) относится к второстепенным минералам в шлаке первого типа, его объёмная доля составляет около 20 %. Минерал локализуется в межзерновом пространстве кристаллов фаялита (см. рис. 2). Пироксен образует короткопризматические индивиды, их максимальный размер не превышает 50 мкм по удлинению. Пироксен слагает сплошной агрегат, который содержит включения магнетита и сульфидов. Результаты анализа химического состава пироксена показывают, что его точки на классификационных диаграммах попадают в поле авгита, при этом они расположены вблизи границы области геденбергита. Август содержит примеси глинозема (Al₂O₃ до 7.0 мас. %), ZnO (до 2.6 мас. %), TiO₂ (до 0.8 мас. %), MgO (до 0.7 мас. %) и MnO (до 0.6 мас. %). Изредка отмечается присутствие BaO (до 0.5 мас. %).

Магнетит (Fe²⁺Fe³⁺₂O₄) в шлаке встречается редко (не более 5 об. %) и образует изометричные и округлые зерна (рис. 2) размером до 10 мкм, которые распылены по всей матрице пироксена, а также в скоплениях сульфидов. Некоторые зерна имеют зональность (хорошо видна в BSE-режиме): в центре развит хромит, а по краям — магнетит. По составу минерал относится к магнетиту и характеризуется повышенным содержанием Al₂O₃ (до 5.1 мас. %) и ZnO (до 3.7 мас. %), что отвечает 11 % минала герцинита и 10 % минала франклинита соответственно. Из других примесей отмечаются TiO₂ (до 3.0 мас. %), SiO₂ (до 0.9 мас. %), Cr₂O₃ (до 0.7 мас. %) и V₂O₃ (до 0.4 мас. %). Кристаллохимическая формула магнетита по данным пересчета — (Fe²⁺_{0.90}Zn_{0.10})_{1.00}(Fe³⁺_{1.62}Al_{0.22}Ti_{0.09}Si_{0.04}Cr_{0.02}V_{0.01})_{2.00}O₄.

Хромит (FeCr₂O₄) в шлаке встречается крайне редко и исключительно в центральной части некоторых зональных зерен шпинелида (рис. 2). Химический состав хромита (в мас. %, средн. из 9-и ан.): SiO₂ — 1.01, TiO₂ — 1.72, Al₂O₃ — 12.62, Cr₂O₃ — 25.36, V₂O₃ — 0.72, Fe₂O₃ — 24.47, FeO — 25.89, ZnO — 7.66, MgO — 0.55 пересчитывается на формулу (Fe²⁺_{0.77}Zn_{0.20}Mg_{0.03})_{1.00}



$(Cr_{0.71}Fe^{3+}_{0.65}Al_{0.53}Ti_{0.05}Si_{0.04}V_{0.02})_{2.00}O_4$. Учитывая высокое содержание цинка в минерале, предполагаем, что хромшпинелид является не реликтовым, а образованным непосредственно в данном минеральном агрегате.

Троилит (FeS) является одним из главных сульфидных минералов в шлаке первого типа. Он слагает отдельные округлые включения размером до 200 мкм в медно-железистых сульфидах (рис. 3). По составу пол-

ностью соответствует троилиту и содержит небольшие примеси Cu (до 1.9 мас. %) и Co (до 0.7 мас. %).

Рудашевскит ((Fe,Zn)S) встречается совместно с троилитом. Он образует зерна неправильных очертаний размером до 100 мкм, исключительно на контакте с троилитом. По химическому составу (в мас. %, средн. из 9 ан.): S — 34.86, Fe — 34.51, Zn — 28.15, Cu — 2.12, Mn — 0.36 — минерал хорошо пересчитывается

Таблица 2. Химический состав фаялита и авгита в шлаках первого типа (в мас. %)

Table 2. Chemical composition of fayalite and augite in slags of the first type (in wt. %)

№ ан. Analysis No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	Sum
1c	30.57	–	–	59.48	1.31	2.87	4.91	0.86	100
1k	29.45	–	0.52	61.33	1.20	3.76	2.54	1.20	100
2c	30.66	–	–	59.19	1.19	3.09	5.08	0.79	100
2k	29.19	–	0.40	61.98	1.23	3.94	1.89	1.37	100
3	43.27	0.60	6.97	28.72	0.51	2.46	0.67	16.80	100
4	43.57	0.81	6.98	27.37	0.55	2.62	0.65	17.45	100
5	44.04	0.65	6.14	28.39	0.52	2.39	0.73	17.14	100

Кристаллохимические формулы / Crystal-chemical formulas

1c	$(Fe_{1.62}Mg_{0.24}Zn_{0.07}Mn_{0.04}Ca_{0.03})_{2.00}[Si_{1.00}O_4]$
1k	$(Fe_{1.71}Mg_{0.13}Zn_{0.09}Ca_{0.04}Mn_{0.03})_{2.00}[(Si_{0.98}Al_{0.02})_{1.00}O_4]$
2c	$(Fe_{1.62}Mg_{0.25}Zn_{0.07}Mn_{0.03}Ca_{0.03})_{2.00}[Si_{1.00}O_4]$
2k	$(Fe_{1.73}Zn_{0.10}Mg_{0.09}Ca_{0.05}Mn_{0.03})_{2.00}[(Si_{0.98}Al_{0.02})_{1.00}O_4]$
3	$(Ca_{0.74}Fe_{0.26})_{1.00}(Fe_{0.73}Al_{0.12}Zn_{0.07}Mg_{0.04}Mn_{0.02}Ti_{0.02})_{1.00}[(Si_{1.78}Al_{0.22})_{2.00}O_6]$
4	$(Ca_{0.77}Fe_{0.23})_{1.00}(Fe_{0.70}Al_{0.13}Zn_{0.08}Mg_{0.04}Ti_{0.03}Mn_{0.02})_{1.00}[(Si_{1.79}Al_{0.21})_{2.00}O_6]$
5	$(Ca_{0.76}Fe_{0.24})_{1.00}(Fe_{0.74}Al_{0.11}Zn_{0.07}Mg_{0.04}Mn_{0.02}Ti_{0.02})_{1.00}[(Si_{1.81}Al_{0.19})_{2.00}O_6]$

Примечание: здесь и далее — ан. — анализ, с — центр зерна, к — край зерна; ан. 1–2 — фаялит, ан. 3–5 — авгит.

Note: from here on — an. — analysis, c — grain center, k — grain edge; an. 1–2 — fayalite, an. 3–5 — augite.

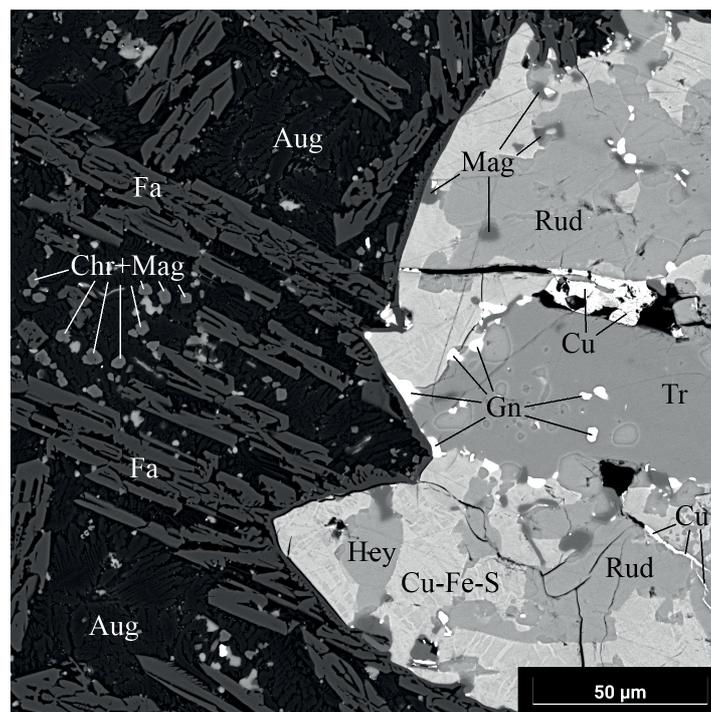


Рис. 2. Контакт силикатной матрицы с сульфидами в шлаке. Условные обозначения: фаялит — Fa, авгит — Aug, хромит — Chr, магнетит — Mag, троилит — Tr, сульфиды Cu-Fe — Cu-Fe-S, галенит — Gn, рудашевскит — Rud, хейкокит — Hey, медь — Cu

Fig. 2. Contact of the silicate matrix with sulfides in the slag. Legend: fayalite — Fa, augite — Aug, chromite — Chr, magnetite — Mag, troilite — Tr, Cu-Fe sulfides — Cu-Fe-S, galena — Gn, rudashevskite — Rud, haycockite — Hey, copper — Cu

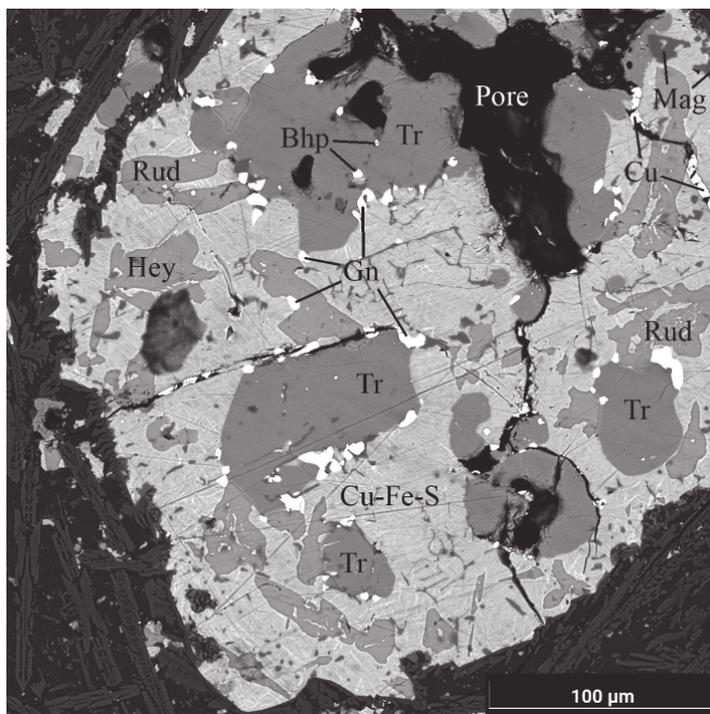


Рис. 3. Сульфидное скопление в шлаке. Условные обозначения: брейтгауптит — Bhp, магнетит — Mag, троилит — Tr, сульфиды Cu-Fe — Cu-Fe-S, галенит — Gn, рудашевскит — Rud, хейкокит — Hey, медь — Cu, пустоты — Pore

Fig. 3. Sulfide accumulation in slag. Legend: breithauptite — Bhp, magnetite — Mag, troilite — Tr, Cu-Fe sulfides — Cu-Fe-S, galena — Gn, rudashevskite — Rud, haycockite — Hey, copper — Cu, voids — Pore

на формулу рудашевскита ($\text{Fe}_{0.57}\text{Zn}_{0.39}\text{Cu}_{0.03}\text{Mn}_{0.01}$) $_{1.00}\text{S}_{1.00}$, который является железистым аналогом сфалерита и встречается в хондритах (Britvin et al., 2008).

Галенит (PbS) достаточно обильно распылен по матрице сульфидных скоплений, реже встречается среди агрегата силикатов. В сульфидной матрице он слагает округлые и вытянутые включения размером до 20–25 мкм, обычно концентрируясь на границе троилита и медно-железистых сульфидов (рис. 2, 3). По составу соответствует галениту и характеризуется небольшой примесью Fe (до 2.6 мас. %).

Сульфиды Cu-Fe являются главными минералами серы в шлаке первого типа и наблюдаются по всей матрице породы. Они образуют округлые выделения размером до 1–2 мм и характеризуются неоднородностью, а также наличием структур распада. Кроме того, в их матрице зафиксированы включения других рудных минералов (см. рис. 2, 3). Химический состав более светлых (в BSE-изображении) зон переменный (в мас. %, средн. из 26 ан.): S — 25.4–27.5, Fe — 15.4–18.4, Cu — 51.3–56.6. Химический состав темных зон существенно железистый (в мас. %, средн. из 18 ан.): S — 27.8–29.6, Fe — 21.6–23.0, Cu — 47.1–49.7. В природных условиях сульфидные соединения указанного состава пока не обнаружены. Однако в лабораторных экспериментах удалось синтезировать аналогичные «расплавные твердые растворы» системы $\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_{2+y}\text{S}_{2-z}$ в интервале температур от 325 до 1012 °C (Kosyakov, Sinyakova, 2014). При этом в шлаке отмечаются выделения и других сульфидов Cu-Fe — **кубанита** (CuFe_2S_3) и **хейкокита** ($\text{Cu}_4\text{Fe}_5\text{S}_8$). Кубанит образует небольшие ксеноморфные зерна размером до 50 мкм среди агрегата пироксена. По составу (в мас. %, средн. из 12 ан.): S — 34.56, Fe — 41.63, Zn — 1.17, Cu — 22.64 — минерал удовлетворительно пересчитывается на формулу ку-

банита — $(\text{Cu}_{0.97}\text{Zn}_{0.05})_{1.02}\text{Fe}_{2.04}\text{S}_{2.94}$. Хейкокит обнаружен в сульфидных шариках, где тоже слагает ксеноморфные выделения размером до 70 мкм рядом с троилитом и рудашевскитом. По составу (в мас. %, средн. из 10 ан.): S — 32.12, Fe — 35.63, Cu — 32.25 — минерал нормально пересчитывается на формулу хейкокита — $\text{Cu}_{4.02}\text{Fe}_{5.05}\text{S}_{7.93}$.

Брейтгауптит (NiSb) встречается исключительно в сульфидных скоплениях, образуя небольшие изометричные включения размером до 15–20 мкм в троилите и хейкоките. По химическому составу (в мас. %, средн. по 11 ан.): Sb — 58.13, As — 8.04, Fe — 5.34, Co — 2.47, i — 26.02 — минерал пересчитывается на формулу стибнида никеля — $(\text{Ni}_{0.76}\text{Fe}_{0.17}\text{Co}_{0.07})_{1.00}(\text{Sb}_{0.82}\text{As}_{0.18})_{1.00}$. В редких случаях отмечаются зерна брейтгауптита с примесью Sn (до 11.9 мас. %).

Вестервельдит (FeAs) встречается в сульфидных шариках, но значительно реже брейтгауптита. Он образует зерна размером до 10 мкм в виде включений в матрице меди. По химическому составу (в мас. %, средн. по 9 ан.): As — 53.43, Sb — 3.68, Fe — 21.26, Co — 8.35, Ni — 9.16, Cu — 4.12 — минерал хорошо пересчитывается на формулу арсенида железа — $(\text{Fe}_{0.51}\text{Ni}_{0.21}\text{Co}_{0.19}\text{Cu}_{0.09})_{1.00}(\text{As}_{0.96}\text{Sb}_{0.04})_{1.00}$.

Медь (Cu) образует скопления и проволоочки размером до 100 мкм в центральной части сульфидных шариков (рис. 2, 3). К сожалению, металл при изготовлении полированных шлифов часто выкрашивается и на его месте остаются дырки. Медь обычно содержит примеси Fe (в пределах 2.1–4.1 мас. %) и S (от 0.4 до 1.7 мас. %). При этом изредка встречаются зерна меди, обогащенные Au (до 12 мас. %).

Серебро (Ag) образует округлые включения размером 5–10 мкм в сульфидных шариках. Металл приурочен к границе троилита и медно-железистых сульфидов.



фидов, где наблюдаются скопления галенита. Серебро чистое и содержит небольшие примеси Fe (до 2.6 мас. %), Cu (до 1.7 мас. %), а также S (до 0.8 мас. %).

Второй тип медных шлаков представлен следующими минералами:

Фаялит ($\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$) является главным минералом и в шлаке второго типа (около 40–45 об. %). Он образует длиннопризматические футляровидные кристаллы размером до 2–3 см в длину (рис. 4). По составу минерал относится к фаялиту (см. табл. 3, ан. 1–2) и содержит примеси ZnO (до 10.2 мас. %), MgO (до 2.1 мас. %), CaO (до 1.0 мас. %), MnO (до 0.8 мас. %), т. е. рассчитываются миналы виллемита (до 13 %), форстерита (до 5 %) и кальциооливина (до 2 %). Имеет слабую зональность, марганец отмечается только в краевых зонах индивидов оливина.

Геденбергит ($\text{CaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$) является второстепенным минералом в шлаке (около 15 об. %) и встречается в интерстициях между призматическими индивидами фаялита (рис. 4, 5). Пироксен образует мелкие короткопризматические индивиды размером не более 30 мкм, которые находятся в матрице стекла. В BSE-режиме имеет самую темную окраску. По химическому составу пироксен вполне однородный (см. табл. 3, ан. 3–5) и на классификационной диаграмме попадает в поле геденбергита. В нем установлены примеси ZnO (до 6.6 мас. %), Al_2O_3 (до 5.3 мас. %) и TiO_2 (до 1.0 мас. %).

Магнетит (FeFe_2O_4) в шлаке встречается часто (не более 20 об. %) и образует идиоморфные изометричные или вытянутые индивиды (рис. 4, 5) размером до 100 мкм, которые распылены по всей матрице породы. Магнетит имеет однородный химический состав и отличается повышенным содержанием ZnO (до 6.9 мас. %) и Al_2O_3 (до 5.0 мас. %), что в пересчете дает 19 % минала франклинита и 11 % минала герцинита.

Кристаллохимическая формула — $(\text{Fe}^{2+}_{0.81}\text{Zn}_{0.19})_{1.00}(\text{Fe}^{3+}_{1.78}\text{Al}_{0.22})_{2.00}\text{O}_4$.

Стекло в шлаке встречается часто, его количество достигает 10 об. %. Оно выполняет интерстиции между индивидами фаялита и содержит включения пироксена, сульфидов и магнетита (рис. 5). При этом размер чистых участков стекла, свободных от включений, достигает 50–70 мкм. Представительный состав стекла (в мас. %): SiO_2 — 39.23; Al_2O_3 — 5.97; FeO — 15.56; PbO — 11.03; ZnO — 17.34; BaO — 2.26; CaO — 7.84; K_2O — 0.77.

Сульфиды Cu-Fe являются главными минералами серы в шлаке второго типа и встречаются по всей матрице породы. Они образуют полифазные сферулы (рис. 5) обычно размером до 100 мкм в диаметре, но иногда достигают 1–2 мм. Часто содержат включения галенита и сфалерита. Матрица сферул сложена следующей фазой (в мас. %, средн. из 25 ан.) — S — 23.6, Fe — 9.6, Cu — 66.8, которая вполне соответствует **борниту** (Cu_5FeS_4 — S — 25.6, Fe — 11.1, Cu — 63.3). В борните наблюдаются структуры распада (пластинки до 5–10 мкм, более светлые в BSE-режиме) с более медистым составом (в мас. %, средн. из 27 ан.): S — 19.6, Fe — 1.7, Cu — 78.7, который отвечает **халькозину** (Cu_2S — S — 20.1, Cu — 79.9).

Сфалерит (ZnS) образует округлые включения (более темные в BSE-режиме на фоне других сульфидов) размером до 40–50 мкм в матрице сульфидных скоплений. По химическому составу сульфид цинка медистый и железистый (в мас. %, средн. из 12 ан.): S — 32.67, Fe — 1.20, Zn — 62.95, Cu — 3.18, что в пересчете дает следующую кристаллохимическую формулу — $(\text{Zn}_{0.94}\text{Cu}_{0.05}\text{Fe}_{0.02})_{1.01}\text{S}_{0.99}$.

Галенит (PbS) достаточно обильно распылен по матрице сульфидных сферул, где он слагает округлые включения и их скопления размером до 20–25 мкм (рис. 5). По составу соответствует галениту и характе-

Таблица 3. Химический состав фаялита и геденбергита в шлаках второго типа (в мас. %)

Table 3. Chemical composition of fayalite and hedenbergite in the second type slags (in wt. %)

№ ан. Analysis No.	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	Sum
1c	29.90	–	–	57.57	–	9.61	2.06	0.86	100
1k	29.57	–	–	57.14	0.68	10.19	1.47	0.95	100
2c	30.11	–	–	58.39	–	8.95	1.78	0.77	100
2k	29.67	–	–	57.86	0.77	9.65	1.36	0.69	100
3	42.83	0.79	4.67	27.03	–	6.13	–	18.55	100
4	42.48	0.96	4.35	26.61	–	6.62	–	18.98	100
5	43.60	0.73	5.32	25.39	–	6.14	–	18.82	100

Кристаллохимические формулы
Crystal-chemical formulas

1c	$(\text{Fe}_{1.62}\text{Zn}_{0.24}\text{Mg}_{0.10}\text{Ca}_{0.03})_{1.99}[\text{Si}_{1.01}\text{O}_4]$
1k	$(\text{Fe}_{1.62}\text{Zn}_{0.26}\text{Mg}_{0.07}\text{Ca}_{0.03}\text{Mn}_{0.02})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$
2c	$(\text{Fe}_{1.65}\text{Zn}_{0.22}\text{Mg}_{0.09}\text{Ca}_{0.03})_{1.99}[\text{Si}_{1.01}\text{O}_4]$
2k	$(\text{Fe}_{1.64}\text{Zn}_{0.24}\text{Mg}_{0.07}\text{Ca}_{0.03}\text{Mn}_{0.02})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$
3	$(\text{Ca}_{0.83}\text{Fe}_{0.17})_{1.00}(\text{Fe}_{0.77}\text{Zn}_{0.19}\text{Ti}_{0.02})_{0.98}(\text{Si}_{1.79}\text{Al}_{0.23})_{2.02}\text{O}_6$
4	$(\text{Ca}_{0.85}\text{Fe}_{0.15})_{1.00}(\text{Fe}_{0.78}\text{Zn}_{0.20}\text{Ti}_{0.03})_{1.01}(\text{Si}_{1.77}\text{Al}_{0.22})_{1.99}\text{O}_6$
5	$(\text{Ca}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_{1.00}(\text{Fe}_{0.72}\text{Zn}_{0.19}\text{Al}_{0.07}\text{Ti}_{0.02})_{1.00}(\text{Si}_{1.81}\text{Al}_{0.19})_{2.00}\text{O}_6$

Примечание: ан. 1–2 — фаялит, ан. 3–5 — геденбергит.

Note: an. 1–2 — fayalite, an. 3–5 — hedenbergite.

ризуется небольшими примесями Cu (до 3.2 мас. %) и Fe (до 2.1 мас. %).

Брейтгауптит (NiSb) часто встречается в сульфидных скоплениях, образуя изометричные зерна размером до 10 мкм. По химическому составу (в мас. %, средн. по 19 ан.): Sb — 47.63, As — 5.28, Sn — 12.92, Fe — 1.20, Cu — 3.68, Ni — 29.29 — минерал пересчитывается на формулу стибнида никеля — $(\text{Ni}_{0.87}\text{Cu}_{0.10}\text{Fe}_{0.04})_{1.01}(\text{Sb}_{0.68}\text{Sn}_{0.19}\text{As}_{0.12})_{0.99}$.

Никелин (NiAs) крайне редко встречается в сульфидных скоплениях. Он образует зерна размером до 5 мкм, в сростании с брейтгауптитом. По составу (в мас. %, средн. по 5 ан.): As — 25.32, Sb — 29.82, Sn — 6.92, Fe — 1.19, Ni — 34.10, Cu — 2.65 — минерал хорошо пересчитывается на формулу никелина — $(\text{Ni}_{0.90}\text{Cu}_{0.07}\text{Fe}_{0.09})_{1.00}(\text{As}_{0.53}\text{Sb}_{0.38}\text{Sn}_{0.09})_{1.00}$.

В крупных сульфидных сферах постоянно встречаются небольшие скопления никелистых халькоге-

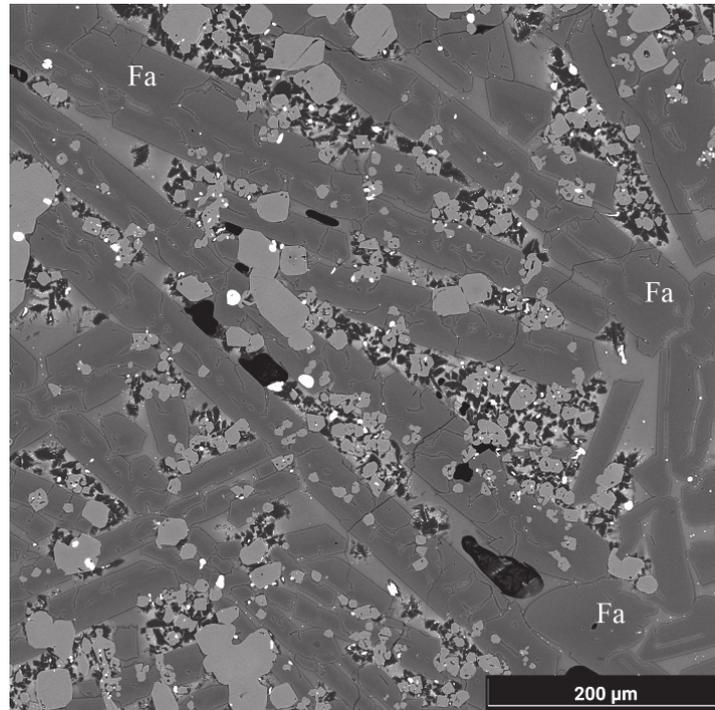


Рис. 4. Внешний вид Кировградского шлака второго типа с призматическими индивидами фаялита (Fa)

Fig. 4. Appearance of the Kirovgrad slag of the second type with prismatic individuals of fayalite (Fa)

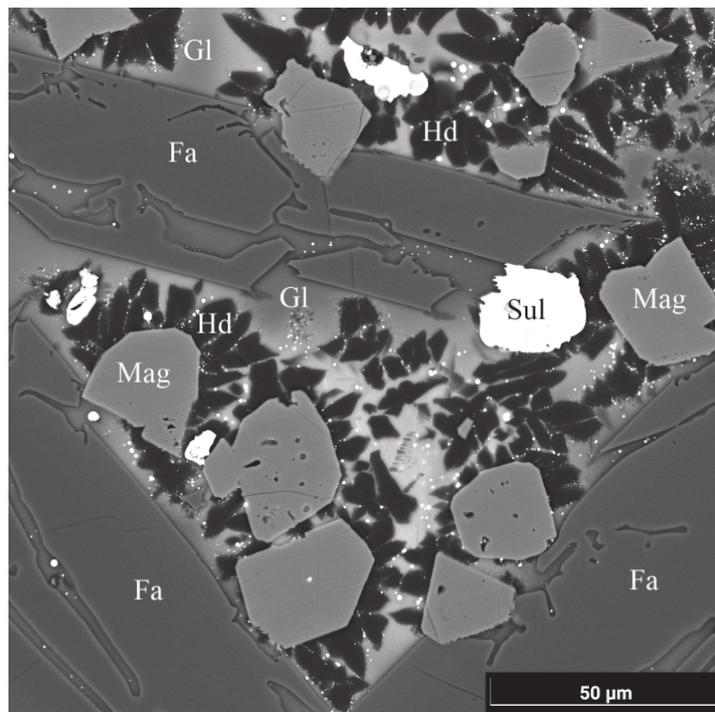


Рис. 5. Магнетит (Mag) и геденбергит (Hd) с сульфидами (Sul) среди стекла (Gl) в интерстициях между индивидами фаялита (Fa) в шлаке второго типа

Fig. 5. Magnetite (Mag) and hedenbergite (Hd) with sulfides (Sul) among glass (Gl) in interstices between fayalite (Fa) individuals in slag of the second type



нидов — пентландита, хизлевудита, шандита и барковита — размером не более 30–35 мкм.

Пентландит $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ является главным минералом скоплений никелистых халькогенидов. Он слагает как центральную часть, так и краевые зоны размером до 10–15 мкм. В центре он сростается с шандитом, образуя «клетчатый» пентландит. В краевых зонах он чистый и без каких-либо включений. Пентландит из центральной зоны более никелистый (в мас. %, средн. из 8 ан.): S — 32.84, Fe — 25.08, Ni — 42.08, что в пересчете дает следующую кристаллохимическую формулу — $(\text{Ni}_{5.57}\text{Fe}_{3.49})_{9.05}\text{S}_{7.95}$. В краевой зоне он более железистый (в мас. %, средн. из 10 ан.): S — 33.19, Fe — 32.59, Ni — 31.61, Co — 1.31, Cu — 1.30 — с формулой $(\text{Fe}_{4.51}\text{Ni}_{4.16}\text{Co}_{0.17}\text{Cu}_{0.16})_{9.00}\text{S}_{8.00}$. По Ni/Fe-отношению (Шишкин и др., 1974) сульфид в центральной зоне относится к группе никелистых пентландитов, а в краевой зоне — к собственно пентландитам.

Хизлевудит (Ni_3S_2) является редким минералом в скоплениях никелистых халькогенидов. Его находки приурочены к краевым зонам пентландита, где он образует округлые выделения размером до 10 мкм. По химическому составу (в мас. %, средн. по 6 ан.): S — 26.88, Fe — 1.71, Ni — 71.41 — относится к хизлевудиту — $(\text{Ni}_{2.92}\text{Fe}_{0.07})_{2.99}\text{S}_{2.01}$.

Шандит $(\text{Ni}_3\text{Pb}_2\text{S}_2)$ является основным минералом в скоплениях никелистых халькогенидов. Он слагает каплевидные и ориентированные включения в матрице пентландита, а также каймы вокруг никелистых скоплений. Размер выделений не превышает 25 мкм. По химическому составу (в мас. %, средн. по 32 ан.): S — 10.14, Pb — 60.12, Cu — 1.78, Fe — 0.70, Ni — 27.26 — минерал хорошо пересчитывается на формулу шандита — $(\text{Pb}_{1.83}\text{Cu}_{0.17})_{2.00}(\text{Ni}_{2.93}\text{Fe}_{0.08})_{3.01}\text{S}_{1.99}$, который изредка встречается в ультраосновных породах

в ассоциации с пентландитом и хизлевудитом (Dymek, 1987).

Барковит $(\text{Ni}_{1.5}\text{Sn})$ образует изометричные и округлые зерна размером до 10–15 мкм. Они встречаются как внутри никелистых скоплений, так и рядом в борнит-халькозиновой матрице (рис. 6). По химическому составу (в мас. %, средн. по 15 ан.): Sn — 40.65, Sb — 12.84, As — 2.04, Cu — 2.51, Fe — 0.80, Ni — 41.16 — минерал удивительно пересчитывается на следующую формулу — $(\text{Ni}_{1.42}\text{Cu}_{0.08}\text{Fe}_{0.03})_{1.53}(\text{Sn}_{0.70}\text{Sb}_{0.21}\text{As}_{0.06})_{0.97}$. В природе минерал установлен недавно в щелочных породах Кольского полуострова (Bosi et al., 2025). При этом как синтетическое вещество Ni_3Sn_2 известен уже давно и активно используется в литиевых батареях (Glazer et al., 2017).

Серебро (Ag) образует проволоочки размером 20 мкм, приуроченные как к выделениям шандита, так и к скоплениям галенита. Серебро достаточно чистое и содержит примеси Cu (до 3.2 мас. %), Fe (до 2.3 мас. %), а также Ni (до 1.7 мас. %).

Медь (Cu) слагает скопления размером до 300 мкм в центральной части крупных сульфидных сферул. Металл содержит включения сульфидов, магнетита и барковита. Медь не содержит каких-либо примесей, очень редко Fe (до 2.5 мас. %).

Обсуждение результатов

В результате проведенного исследования в шлакоотвалах Кировградского медеплавильного завода отчетливо выделяются два типа медных шлаков:

Первый тип шлаков имеет тонко- и мелкозернистое строение и сложен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, хромита и арсенидно-стибнидно-сульфидной минерализации, а также меди

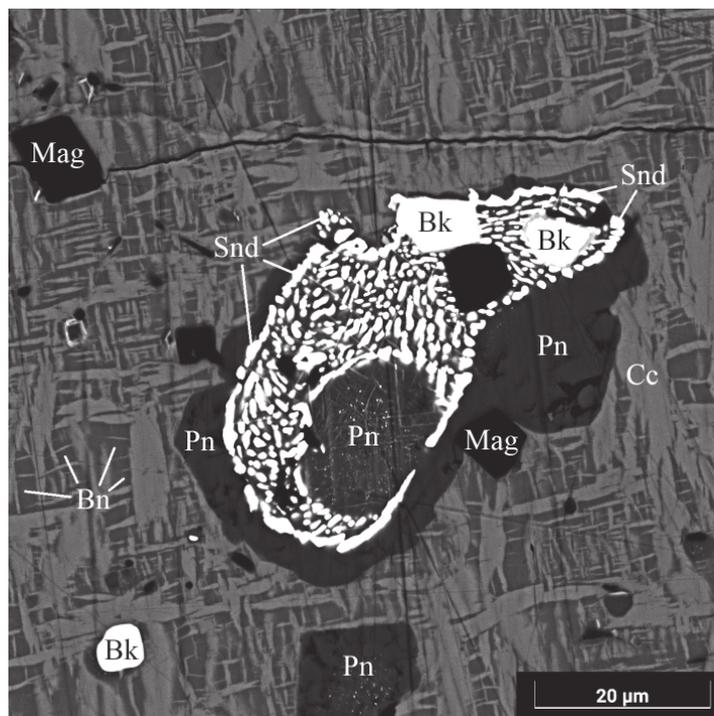


Рис. 6. Скопления никелистых халькогенидов в матрице крупных сульфидных выделений. Условные обозначения: пентландит — Pn, магнетит — Mag, шандит — Snd, халькозин — Cc, борнит — Bn, барковит — Bk

Fig. 6. Nickel-rich chalcogenide clusters in the matrix of large sulfide segregations. Legend: pentlandite — Pn, magnetite — Mag, shandite — Snd, chalcocite — Cc, bornite — Bn, barkovite — Bk



и серебра. Халькогениды представлены троилитом, кубанитом, хейкоцитом, рудашевскитом, галенитом, брейтгауптитом, вестервельдитом и неопределяемыми сульфидами Cu-Fe. Минералогия шлака хорошо согласуется с микроэлементным составом породы. Во всех породообразующих минералах, т. е. в фаялите и авгите, а также в магнетите и хромите отмечается повышенная примесь цинка. В магнетите и хромите в значимых количествах находятся примеси титана и ванадия, а хром является главной составляющей хромита. Барий в виде примесей отмечался в клинопироксене. Кроме того, в шлаке присутствуют собственные минералы цинка, мышьяка и свинца — рудашевскит, вестервельдит и галенит соответственно.

Второй тип шлаков имеет крупно- и гигантозернистое строение и представлен фаялит-геденбергитовым агрегатом со значительным присутствием магнетита, стекла и арсенидно-стибнидно-сульфидной минерализации, а также барковита, меди и серебра. Халькогениды представлены борнитом, халькозином, сфалеритом, галенитом, пентландитом, хизлевудитом, брейтгауптитом, никелином и шандитом. Полученная минералогия полностью подтверждает микроэлементный состав шлака. Так, во всех породообразующих минералах, т. е. в фаялите и авгите, а также в магнетите отмечается аномально высокая примесь цинка, а также установлен собственный минерал цинка — сфалерит. Присутствие свинца в шлаке подтверждается не только галенитом, но и шандитом. Высокое содержание олова доказывается собственным минералом — барковитом и примесями в никелине и брейтгауптите. Опять же, обогащенность шлака никелем объясняется присутствием целого ряда минералов — пентландитом, хизлевудитом, барковитом, никелином, брейтгауптитом и шандитом.

Находка двух разных типов шлака хорошо согласуется с тем, что в последние годы своей работы Кировградский комбинат сменил свою рудную базу. С самого основания и вплоть до начала 2000-х годов завод плавил медно-колчеданные руды местных, расположенных в окрестностях Кировграда месторождений Левихинского рудного поля (Амирасланов, 1934). И мы считаем, что первый тип шлака был получен в этот временной период. Косвенным доказательством этому служит работа В. В. Лапина о составе фаялита из шлаков Кировградского завода, опубликованная в 1941 г., где указывалось, что содержание ZnO в фаялите составляет 4.7 вес. % (Лапин, 1941). Этот показатель близок к полученному нами количеству ZnO (до 3.9 мас. %) в фаялите. В 2003 г. рудники Левихинского поля полностью истощились и завод стал использовать медно-колчеданную руду Сафьяновского полиметаллического месторождения. По всей видимости, второй тип шлаков характеризует современные плавки колчеданных руд, т. к. сафьяновские руды богаты сфалеритом, а также содержат оловянные минералы — касситерит, станноидит и др. (Сафина и др., 2024 и др.).

Оценить объемы отвалов медного шлака Кировградского завода достаточно сложно, какая-то их часть уже утеряна. Так, в 60-х годах было установлено, что все довоенные шлаки были использованы как закладочный материал в горные выработки Калатинского и Обновленного рудников, а также на дорожное строительство. Кроме того, известно, что два

отвала шлаков застроены складами и на них проложены ж/д пути. В 1956 г. запасы шлаков в отвалах предприятия оценивались в 9 млн тонн, в 1982 г. — в 15 млн тонн, а на начало 2000 г. уже в 20 760 тыс. тонн (Мормиль, 2002). Сколько сейчас накоплено предприятием, не озвучивается, но примерно можно говорить о 25 млн тонн шлака. При этом завод проводит их вторичную переработку, но большая их часть всё равно идет в шлакоотвал.

Медные шлаки Кировградского завода являются техногенным месторождением (Макаров, Талалай, 2012 и др.) и могут быть переработаны (сам завод частично этим и занимается). Во-первых, в них присутствует промышленное содержание серебра в пределах 13–22 г/т (в нашей стране сейчас рентабельно добывать данный металл при содержании от 10 до 100 г/т). При этом ранее отмечалось, что шлаки содержат 7.8 г/т серебра и попутно 0.4 г/т золота (Мормиль, 2002). К сожалению, содержание золота в шлаках нами не определялось. Во-вторых, для извлечения доступен медно-оловянно-цинковый сульфидный концентрат (при помощи флотации), который можно далее использовать для выплавки черновой меди, цинка или бронзы. В этом же концентрате будут находиться такие ценные металлы, как свинец и никель, которые тоже необходимы промышленности. В-третьих, в разных типах шлаков посредством магнитной сепарации возможно выделение хромит-магнетитовых либо магнетитовых концентратов, характеризующихся присутствием ценных примесных элементов — ванадия, хрома, титана и цинка. После извлечения магнитных фракций остаточная масса, представленная железистыми силикатами и стекловидной фазой, также обладает рудообразующим потенциалом — в частности, за счёт значимого содержания оксида цинка. При этом если учесть, что промышленные технологии селективного извлечения железа из силикатной матрицы пока экономически нерентабельны, то, возможно, в сочетании с добавочным выделением цинка они могут стать вполне окупаемыми.

Присутствие отвалов медных шлаков в городской черте Кировграда обуславливает дополнительную техногенную нагрузку на проживающее там население. Экологические службы в почвах городской застройки уже обнаружили избыток свинца, меди, цинка и кадмия, что превышает норму в три–пять раз (Обзор..., 2024). Этот избыток металлов в почвах формируется в том числе за счет рассеянного здесь медного шлака, что и приводит к той самой техногенной «пустыне», которую может наблюдать любой человек, посетивший Кировград и окрестности завода.

Заключение

Таким образом, впервые проведено минералогическое исследование шлаков Кировградского медеплавильного завода. В результате установлено, что рассматриваемые техногенные образования представлены двумя типами, различающимися по своим минералого-геохимическим характеристикам. Первый тип шлаков характеризуется минеральным составом, включающим фаялит, авгит, магнетит, хромит, халькогениды, медь и серебро. При этом халькогенидная минерализация разнообразная и сложена троилитом, куба-



нитом, хейкокитом, рудашевскитом, галенитом, брейтгауптитом, вестервельдитом и неопределяемыми сульфидами Cu-Fe. Второй тип шлаков характеризуется другим минеральным составом: фаялитом, геденбергитом, магнетитом, стеклом, никелином, брейтгауптитом, сульфидами, барковитом, медью и серебром. Халькогениды из шлаков второго типа представлены борнитом, халькозином, сфалеритом, галенитом, пентландитом, хизлевудитом, брейтгауптитом, никелином и шандитом. Минералогия шлаков хорошо согласуется с их микроэлементным составом. Сделан вывод, что шлаки первого типа получились в результате переплавки медно-колчеданных руд Левихинской группы месторождений, а второго типа — полиметаллических руд Сафьяновского месторождения. Шлаки Кировградского завода можно переработать с выделением сульфидного и магнетитового концентратов и попутного серебра.

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

Литература / References

- Металлургические заводы Урала XVII–XX вв.: Энциклопедия /* Гл. ред. В. В. Алексеев. Екатеринбург: Академкнига, 2001. 536 с.
Metallurgical factories of the Urals. The 17th–20th centuries: Encyclopedia. Chief editor V. V. Alekseev. Yekaterinburg: Akademkniga; 2001. 536 p. Russian.
- Амирасланов А.* Левихинская группа колчеданных месторождений на Урале // Труды Геологического института. 1934. Т. 4. С. 105–139.
Amiraslanov A. Levikhinskaya group of pyrite deposits in the Urals. Proceedings of the Geological Institute. 1934;4:105–139. Russian.
- Ерохин Ю. В., Пономарев В. С., Захаров А. В., Леонова Л. В.* Минералогия медных шлаков Выйского завода // Вестник геонаук. 2025. № 5 (365). С. 29–35. DOI: 10.19110/geov.2025.5.4
Erokhin Yu. V., Ponomarev V. S., Zakharov A. V., Leonova L. V. Mineralogy of copper slags of the Vyisky plant. Vestnik of Geosciences. 2025;5(365):29–35. Russian.
- Ларин В. В.* О составе фаялитового силиката в шлаке медного штейна // Труды Института геологических наук, 1941. Вып. 40. С. 5–13.
Larin V. V. On the composition of fayalite silicate in copper matte slag. Proceedings of the Institute of Geological Sciences. 1941;40:5–13. Russian.
- Макаров А. Б., Талалай А. Г.* Техногенно-минеральные месторождения и их экологическая роль // Литосфера. 2012. № 1. С. 172–176.
Makarov A. B., Talalay A. G. Technogenic mineral deposits and their ecological role. Lithosphere. 2012;12(1):172–176. Russian.
- Мормиль С. И., Сальников В. Л., Амосов Л. А., Хасанова Г. Г., Семьячков А. И., Зобнин Б. Б., Бурмистренко А. В.* Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействия на окружающую среду. Екатеринбург: ДПР по Уральскому региону, 2002. 206 с.
Mormil S. I., Salnikov V. L., Amosov L. A., Khasanova G. G., Semyachkov A. I., Zobnin B. B., Burmistrenko A. V. Technogenic deposits of the Middle Urals and assessment of their impact on the environment. Yekaterinburg: Subsoil Use Department for the Ural region; 2002. 206 p. Russian.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год /* Отв. ред. Г. М. Черногаев. М.: Росгидромет, 2024. 215 с.
Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2023. Ed. G. M. Chernogaev. Moscow: Roshydromet; 2024. 215 p. Russian.
- Сафина Н. П., Коровко А. В., Блинов И. А., Анкушева Н. Н., Рассомахин М. А., Филиппова К. А.* Минералогические особенности и физико-химические условия образования жильной минерализации южного фланга Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал) // Минералогия. 2024. Т. 10. № 4. С. 75–97. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-4
Safina N. P., Korovko A. V., Blinov I. A., Ankusheva N. N., Rassomakhin M. A., Filippova K. A. Mineralogical features and physicochemical formation of conditions of vein mineralization of the southern flank of the Saf'yanovka massive sulfide deposit (Central Urals). Mineralogy. 2024;10(4):75–97. Russian.
- Шишкин Н. Н., Карпенков А. М., Кулагов Э. А., Митенков Г. А.* О классификации минералов группы пентландита // Доклады АН СССР. 1974. Т. 217. № 1. С. 194–197.
Shishkin N. N., Karpenkov A. M., Kulagov E. A., Mitenkov G. A. On the classification of minerals of the pentlandite group. Reports of the USSR Academy of Sciences. 1974;217(1):194–197. Russian.
- Bosi F., Hatert F., Pasero M., Mills S. J.* IMA Commission on new minerals, nomenclature and classification (CNMNC) — Newsletter 85. European Journal of Mineralogy. 2025;37:337–342. DOI: 10.5194/ejm-37-337-2025
- Britvin S. N., Bogdanova A. N., Boldyreva M. M., Aksenova G. Y.* Rudashevskyite, the Fe-dominant analogue of sphalerite, a new mineral: description and crystal structure. American Mineralogist. 2008;93:902–909. DOI: 10.2138/am.2008.2582
- Chun T., Ning C., Long H., Li J., Yang Y.* Mineralogical characterization of copper slag from Tongling Nonferrous Metals Group China. JOM (Journal of the Minerals, Metals & Materials Society). 2016;68(9):2332–2340. DOI: 10.1007/s11837-015-1752-6
- Dymek R. F.* Shandite, Ni₃Pb₂S₂, in a serpentized metadunite from the Isua supracrustal belt, West Greenland. Canadian Mineralogist. 1987;25:245–249.
- Glazer M. P. B., Wang J., Cho J., Almer J. D., Okasinski J. S., Braun P. V., Dunand D. C.* In operando X-ray diffraction strain measurement in Ni₃Sn₂ — coated inverse opal nanoscaffold anodes for Li-ion batteries. Journal of Power Sources. 2017;367:80–89. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.09.040
- Kosyakov V. I., Sinyakova E. F.* Melt crystallization of CuFe₂S₃ in the Cu-Fe-S system. Journal Thermal Analysis Calorimetry. 2014;115:511–516. DOI: 10.1007/s10973-013-3206-0
- 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
- Sanchez M., Sudbury M.* Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management. Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. 2013;49:161–168. DOI: 10.2298/JMMB120814011S

Поступила в редакцию / Received 1.10.2025