

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>  
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № 3 / 2025, Vol. 12, Iss. 3 <https://resources.today/issue-3-2025.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/09NZOR325.pdf>

DOI: 10.15862/09NZOR325 (<https://doi.org/10.15862/09NZOR325>)

1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические, географические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Ерохин, Ю. В. Медные шлаки Нейво-Рудянского завода (вещественный состав и геоэкология) / Ю. В. Ерохин, И. Н. Тупиков, П. Б. Ширяев // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 3. — URL: <https://resources.today/PDF/09NZOR325.pdf>. DOI: 10.15862/09NZOR325.

**For citation:**

Erokhin Yu.V., Tupikov I.N., Shiryayev P.B. Copper slags of the Neivo-Rudyansky plant (material composition and geoeology). *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(3): 09NZOR325. Available at: <https://resources.today/PDF/09NZOR325.pdf>. DOI: 10.15862/09NZOR325. (In Russ., abstract in Eng.).

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

УДК 549.0+669.181.28(470.5)

**Ерохин Юрий Викторович**

ФГБУН «Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого  
Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Россия  
Ведущий научный сотрудник  
Кандидат геолого-минералогических наук  
E-mail: [Erokhin-yu@yandex.ru](mailto:Erokhin-yu@yandex.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0577-5898>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=66412](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=66412)

**Тупиков Илья Николаевич**

МАОУ «Средняя образовательная школа № 9», пос. Нейво-Рудянка, Россия  
Учитель истории  
E-mail: [tupikov.ilya@mail.ru](mailto:tupikov.ilya@mail.ru)

**Ширяев Павел Борисович**

ФГБУН «Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого  
Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Россия  
Старший научный сотрудник  
Кандидат геолого-минералогических наук  
E-mail: [pavel.shiryayev@gmail.com](mailto:pavel.shiryayev@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3090-6001>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=897248](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=897248)

## Медные шлаки Нейво-Рудянского завода (вещественный состав и геоэкология)

**Аннотация.** В статье рассмотрен вещественный состав и геоэкология медных шлаков Нейво-Рудянского завода, действовавшего с 1810 по 1918 гг., вокруг которого постепенно вырос современный пос. Нейво-Рудянка (Средний Урал, Свердловская область). При этом завод изначально строился как медеплавильный и занимался выплавкой меди с 1810 по 1849 гг. (этот факт установлен нами по архивным документам). До недавнего времени считалось, что Нейво-Рудянский завод был исключительно чугуноплавильным и железоделательным. Вещественный состав исследованных образцов получен методами сканирующей электронной

микроскопии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и рентгеноспектрального анализа. Установлено, что шлаки сложены оливиновым (фаялитом) агрегатом с присутствием пироксена, магнетита, герцинита, стекла, металлической меди и сульфидной минерализации (троилита, борнита, дигенита, пентландита и галенита). Вторичная минерализация представлена малахитом, баритом и гипсом. Изученные шлаки являются отходами медеплавильного производства, а в качестве сырья использовались сульфидные руды, которые добывались на близлежащих к заводу рудниках. Данные шлаки можно целиком переработать, а именно получить из них медно-сульфидный, герцинит-магнетитовый и фаялитовый концентраты, которые далее можно использовать в металлургическом переделе. Изученные шлаки, по всей видимости, несут экологическую угрозу Рудянскому пруду и самому поселку Нейво-Рудянка, т. к. были отсыпаны непосредственно в пруд для прокладки дороги (Рудянский пруд разделен пополам грунтовой дорогой с вкраплениями шлака).

**Ключевые слова:** Средний Урал; Нейво-Рудянский завод; медные шлаки; минералогия; геохимия; геоэкология; медь; фаялит; сульфиды

## Введение

Исследование шлаков медеплавильного производства является важной и актуальной задачей, как с точки зрения экологии, так и для возможного промышленного использования (многие из них представляют собой потенциальную руду). Переплавка колчеданных руд для получения черновой меди всегда дает большой объем металлургического шлака. На современных медеплавильных предприятиях мира выход шлака в зависимости от технологий составляет 2–5 тонн на одну тонну получаемой черновой меди [1]. На сегодняшний день по всему миру накопились огромные объемы медных шлаков, в том числе и в Уральском регионе, который долгое время являлся одним из главных металлургических центров России.

Изучением вещественного состава отходов медеплавильного производства занимаются многие исследователи. Активно исследуются шлаки современных действующих медеплавильных комбинатов, т. к. на них накоплены огромные объемы отходов металлургического производства, и они являются центром экологических проблем. При этом данные шлаки отличаются промышленным содержанием меди и других халькофильных элементов, и даже благородных металлов — золота и серебра [2 и мн. др.]. Старинными медеплавильными заводами на данный момент практически не занимаются, т. к. с ними связаны небольшие объемы шлакоотвалов, а значит здесь нет особых перспектив вторичной переработки и каких-либо экологических проблем. Старинные и древние шлакоотвалы исследуют либо с целью археологических изысканий [3 и мн. др.], либо ради интересных или уникальных минералогических находок [4 и мн. др.].

В настоящей работе мы приводим результаты изучения медных шлаков Нейво-Рудянского завода, который был основан Алексеем Ивановичем Яковлевым, внуком Саввы Яковлевича Яковлева (Собакина), известного заводчика и крупнейшего российского предпринимателя второй половины XVIII века Российской империи. Цель исследования — изучение минералогии медных шлаков Нейво-Рудянского завода для оценки их влияния на экологию района и возможного использования в дальнейшем металлургическом переделе.

## Краткая история Нейво-Рудянского завода

Современные люди в районе будущего завода поселились в начале XVIII века, т. к. первое упоминание об этом месте появилось в 1732 году. Сначала это была деревня Ломовского железного рудника, который разрабатывался для нужд Верхнетагильского чугуноплавильного

завода. Позже, примерно с 1780 г., она стала называться деревней Рудянской. В 1781 г. на Ломовском руднике нашли медные руды, что послужило толчком к основанию завода. К сожалению, смерть Саввы Яковлева в 1784 г. и последующий пятилетний раздел его имущества временно отложили это дело. В результате дележа имуществом владельцем Верхнетагильского и Верх-Нейвинского заводов с окружающими деревнями стал Иван Саввич Яковлев, который и стал добиваться разрешения о постройке завода. В 1795 г. разрешение было получено, но закладка завода по каким-то причинам откладывалась, хотя медные руды стали плавить на двух опытных печах при Верх-Нейвинском заводе. В 1799 г. вблизи с деревней Рудянской было обнаружено богатое медноколчеданное Алексеевское месторождение. Казалось бы, вот уже назрела постройка завода, но в 1801 г. И.С. Яковлев неожиданно умер. Раздел имущества опять продолжался пять лет и в 1806 г. владельцем окружающих заводов стал его сын, Алексей Иванович Яковлев. В 1810 г. было открыто еще одно богатое месторождение меди — Ежовское, что и сподвигло к более быстрой закладке завода. В этом же году на реке Нейва была насыпана плотина и основан Нейво-Рудянский медеплавильный завод. На нем функционировало пять печей для выплавки меди, а также кричная (железная) фабрика и кузня. Чугун для переделки в железо привозился из Верх-Нейвинского завода. Со временем медные рудники стали беднеть и в 1828 г. были найдены медные руды Иоанна-Предтеченского месторождения. К сожалению, медных руд хватило всего на 37 лет и уже в 1847 г. были закрыты Алексеевский и Ежовский рудники. В 1849 г. умер А.И. Яковлев и одновременно из-за нехватки сырьевой базы Нейво-Рудянский завод перестал выплавлять медь [5–7].

При этом, вероятнее всего, остановка медеплавильного производства была больше связана со смертью Алексея Ивановича Яковлева, а не с выработкой местных медных рудников. Район Нейво-Рудянского завода является меденосным и в начале прошлого века, немного севернее поселка Нейво-Рудянка, был заложен большой Калатинский (ныне Кировградский) медный завод. По всей видимости, наследникам А.И. Яковлева было гораздо выгоднее добывать золотоносные пески (ради чего Рудянский пруд был полностью осушен), а не развивать медную отрасль района.

Интересно, что в энциклопедии по металлургии Урала [8] Нейво-Рудянский завод считается исключительно чугуноплавильным и железоделательным. В 1870-х гг., после окончания добычи местного золота, новым владельцем (дочь А.И. Яковлева — графиня Надежда Алексеевна Стенбок-Фермор) была реанимирована работа завода и построена доменная печь для чугуноплавильного производства. Передел чугуна происходил здесь же. Его производство на заводе постоянно росло: в 1882 г. выплавлено 292 тыс. пудов чугуна, в 1891 г. — 534 тыс. пудов, в 1914 г. — 623 тыс. пудов. Выработка железа при этом падала и планировалось, что завод станет только чугунолитейным. Этим планам помешала Первая мировая война, завод стал угасать и выплавка чугуна резко упала: в 1916 г. изготовили 240 тыс. пудов, в 1917 г. — 366 тыс. пудов. В 1918 г. Нейво-Рудянский завод был национализирован советской властью и во время Гражданской войны он окончательно прекратил свою работу [8].

### Методы исследования

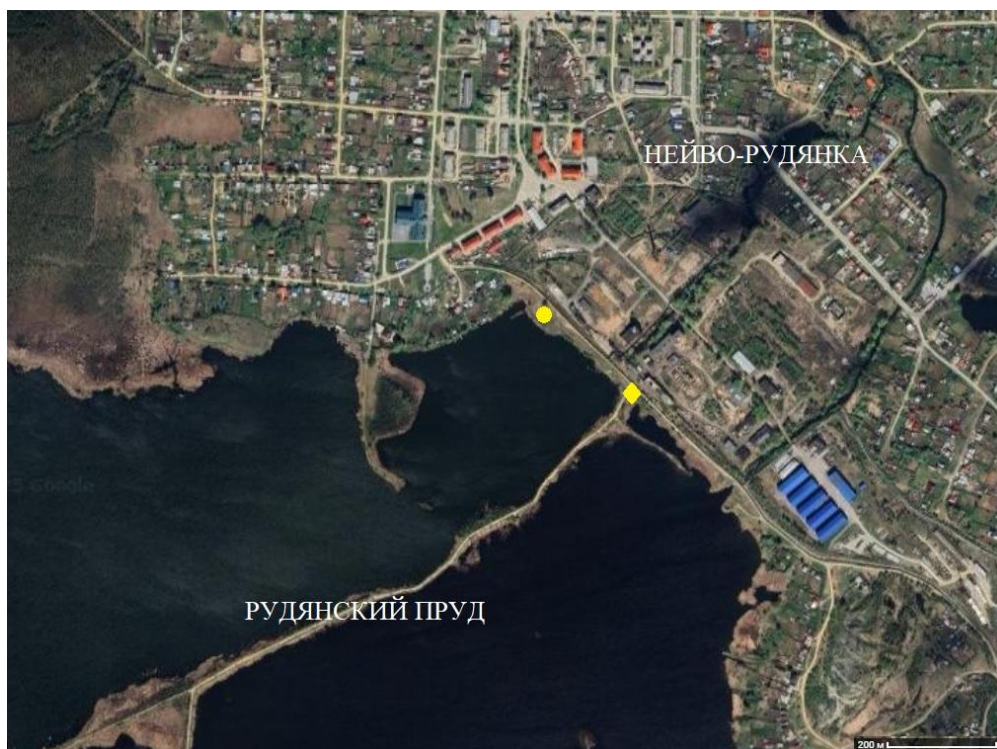
Определения химического состава минералов и фотографии в режиме BSE (обратно-рассеянных электронов) выполнены с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик Н.Н. Фаррахова). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков образцов. Полученные составы минералов пересчитывались 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. Татарина). Потери при прокаливании установлены гравиметрическим методом. К сожалению, из-за высокого содержания железа в пробе, определение отношения окисной и закисной формы железа не проводилось.

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. Филипова).

### Место отбора образцов

Шлаки отобраны коллективом авторов статьи в июне 2024 г. в дамбе Рудянского пруда между двумя шлюзами, через которые протекает р. Нейва (рис. 1). Шлаки обнаружены в виде отсыпки по всей поверхности дороги (привязка с GPS-навигатора — N 57°33'45.7", E 60°13'97.6"), которая проходит по дамбе, а также разделяет Рудянский пруд. По всей видимости, медные шлаки использовались для отсыпки самой дороги. Интересно, что возле дамбы сохранился небольшой фрагмент шлакоотвала, но там медные шлаки не обнаружены, а встречаются исключительно отходы железодельного и чугуноплавильного производства. Отобранные шлаки (всего около 20 образцов) имеют черную окраску (снаружи и внутри) и уплощенный облик, по всей видимости, их выливали в плоские изложницы. Пористость в шлаках низкая (не более 10 об. %) и они характеризуются присутствием зеленоватых налетов вторичных минералов меди. Из имеющихся шлаков нами были выделены 5 типовых образцов, которые были подвергнуты детальным исследованиям.



*Рисунок 1. Юго-западная окраина пос. Нейво-Рудянка. Место отбора медных шлаков указано ромбом, кругом — шлакоотвал чугуноплавильного и железодельного производства (сделано авторами с использованием Google.Карты)*

## Результаты исследований и их обсуждение

В результате исследований установлено, что отобранные нами шлаки сложены оливинным (фаялитом) агрегатом с присутствием пироксена, магнетита, герцинита, стекла, металлической меди и сульфидной минерализации. Химический и микроэлементный состав шлака представлен в таблице 1. Присутствие небольшого количества потерь при прокаливании указывает на слабые вторичные изменения породы. Ниже приводится детальное описание минералов шлака.

**Фаялит** ( $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ ) является главным (до 60 об. %) минералом в шлаке, где он слагает длиннопризматические скелетные кристаллы, размером до 1–2 мм (рис. 2, 3), образуя специфическую структуру спинифекс. Крупные кристаллы оливина являются зональными: центральные зоны содержат до 13,4 мас. %  $\text{MgO}$  и сложены гортонолитом, а краевые — до 6,6 мас. %  $\text{MgO}$  и относятся к феррогортонолиту (табл. 2, ан. 1–2). В окружающем стекле встречаются мелкие иглы фаялита, размером до 100 мкм в длину, которые по составу полностью соответствуют краевым зонам больших кристаллов фаялита. В оливине отмечаются и другие примеси —  $\text{MnO}$  (до 1,5 мас. %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 0,8 мас. %) и  $\text{CaO}$  (до 0,5 мас. %). По своему составу данный фаялит напоминает оливин из медных шлаков Выйского завода [9].

Таблица 1

### Химический и микроэлементный состав шлака Нейво-Рудянского завода

$\text{SiO}_2$	36,64	Sc	9,19	Ag	1,99	Gd	2,78
$\text{TiO}_2$	0,18	Ti	1 256,0	Mo	31,50	Tb	0,45
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,22	V	122,0	Cd	< 0,22	Dy	2,80
$\text{FeO}_{\text{общ}}$	44,73	Cr	185,0	In	1,25	Ho	0,67
$\text{MnO}$	1,11	Co	268,0	Sn	4,67	Er	2,11
$\text{MgO}$	3,50	Ni	134,0	Sb	79,20	Tm	0,32
$\text{CaO}$	6,90	Zn	2 844,0	Te	0,15	Yb	1,98
$\text{CuO}$	0,91	Ga	9,01	Cs	0,45	Lu	0,34
$\text{Na}_2\text{O}$	0,46	As	25,00	Ba	174,0	Hf	1,02
$\text{K}_2\text{O}$	0,62	Se	< 2,35	La	10,10	Ta	0,86
$\text{SO}_3$	0,72	Rb	9,33	Ce	19,90	W	5,91
П.п.п.	1,01	Sr	125,0	Pr	2,61	Pb	318,0
Li	10,30	Y	21,40	Nd	11,80	Bi	0,33
Be	0,61	Zr	35,30	Sm	2,41	Th	1,73
B	127,0	Nb	3,09	Eu	0,85	U	2,61

Химический состав дан в мас. %; а микроэлементный — в г/т. Составлено авторами

**Пижонит** ( $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ) является второстепенным минералом в шлаке (около 15 об. %) и встречается в интерстициях между длиннопризматическими кристаллами фаялита (рис. 3).

Таблица 2

### Представительные составы фаялита и пижонита (в мас. %) в шлаке

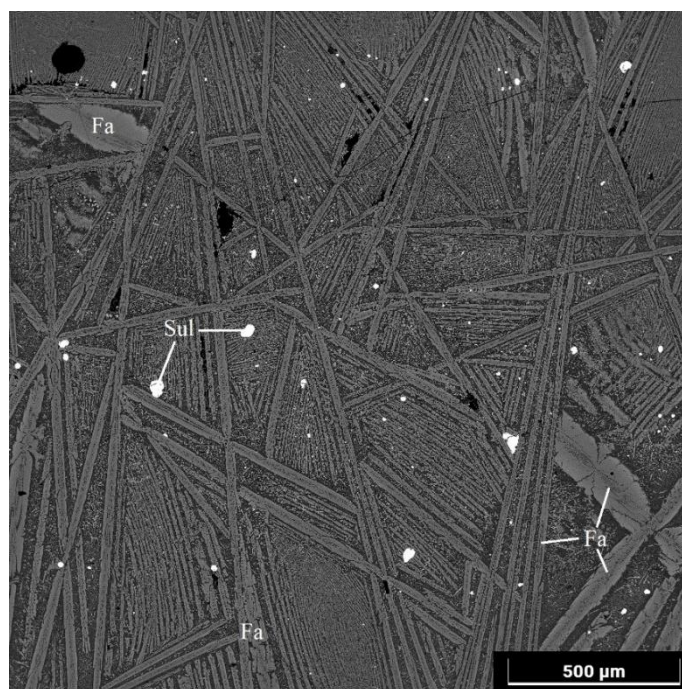
№ ан.	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{ZnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	Сумма
Фаялит									
1ц	32,46	—	—	53,44	1,18	—	12,74	0,18	100
1кр	30,08	—	0,82	61,31	1,44	—	5,87	0,48	100
2ц	32,52	—	—	52,69	1,11	—	13,44	0,24	100
2кр	30,43	—	0,59	60,48	1,49	—	6,59	0,42	100
Пижонит									
3	32,19	0,77	13,40	42,59	—	0,46	—	10,58	100
4	32,30	0,68	13,41	42,24	—	0,45	—	10,92	100
Эмпирические формулы									
1ц	$(\text{Fe}_{1.37}\text{Mg}_{0.59}\text{Mn}_{0.03}\text{Ca}_{0.01})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$								
1кр	$(\text{Fe}_{1.66}\text{Mg}_{0.28}\text{Mn}_{0.04}\text{Ca}_{0.02})_{2.00}[(\text{Si}_{0.97}\text{Al}_{0.03})_{1.00}\text{O}_4]$								
2ц	$(\text{Fe}_{1.35}\text{Mg}_{0.61}\text{Mn}_{0.03}\text{Ca}_{0.01})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$								
2кр	$(\text{Fe}_{1.63}\text{Mg}_{0.32}\text{Mn}_{0.04}\text{Ca}_{0.01})_{2.00}[(\text{Si}_{0.98}\text{Al}_{0.02})_{1.00}\text{O}_4]$								
3	$(\text{Fe}_{1.49}\text{Ca}_{0.47}\text{Zn}_{0.02}\text{Ti}_{0.02})_{2.00}[(\text{Si}_{1.34}\text{Al}_{0.66})_{2.00}\text{O}_6]$								
4	$(\text{Fe}_{1.47}\text{Ca}_{0.49}\text{Zn}_{0.02}\text{Ti}_{0.02})_{2.00}[(\text{Si}_{1.34}\text{Al}_{0.66})_{2.00}\text{O}_6]$								

ц — центр зерна; кр — край зерна; № ан. — номер анализа. Составлено авторами

Пироксен образует мелкие призматические индивиды, размером не более 50 мкм, которые находятся в матрице стекла. Местами пироксена так много, что формируется его агрегат. По химическому составу (табл. 2, ан. 3, 4) пироксен уверенно определяется как железистый пижонит с содержанием CaO (в узких пределах 10,5–11 мас. %). В нем установлены примеси Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 13,4 мас. %), TiO<sub>2</sub> (до 0,8 мас. %) и ZnO (до 0,5 мас. %). В природе пижонит — типичный минерал вулканитов основного и ультраосновного состава, а также метеоритов. В шлаках этот пироксен встречается редко, нами он описывался в отходах медного производства Карабашского завода [10].

**Стекло** в шлаке отмечается часто, его количество достигает 10 об. %. Оно выполняет интерстиции между индивидами фаялита и содержит многочисленные включения оливина, пироксена и рудных минералов. Чистые участки стекла встречаются вблизи крупных кристаллов фаялита, их размер редко превышает 20–30 мкм. Представительный состав этого стекла следующий (в мас. %): SO<sub>3</sub> 0,90; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,38; SiO<sub>2</sub> 48,39; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 16,89; FeO 22,56; MnO 0,55; MgO 0,58; CaO 7,27; Na<sub>2</sub>O 1,01; K<sub>2</sub>O 1,45. На диаграмме TAS данное стекло попадает в поле базальтов, т. е. относится к нормальным основным вулканитам.

**Магнетит** (Fe<sup>2+</sup>Fe<sup>3+</sup><sub>2</sub>O<sub>4</sub>) в шлаке встречается часто (не более 5–10 об. %) и образует два типа выделений. Первый тип — кристаллы октаэдрического облика, размером до 50 мкм, с каймами герцинита, а второй тип — вытянутые скелетные и расщепленные зерна (рис. 3), размером до 50 мкм, которые распылены по всей матрице стекла. В кристаллах магнетит характеризуется повышенным содержанием глинозема (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 13,9 мас. %), что отвечает 29 % минала герцинита. В стекле магнетит отличается меньшим содержанием глинозема (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 10 мас. %), что пересчитывается на 21 % минала герцинита. Из других примесей (табл. 3) в шпинелиде отмечаются магний (MgO до 1,3 мас. %), титан (TiO<sub>2</sub> до 1,2 мас. %), хром (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 0,9 мас. %), цинк (ZnO до 0,8 мас. %) и ванадий (V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 0,4 мас. %). Магнетит для медных шлаков является обычным рудным минералом [11 и мн. др.]. Интересно, что ранее в медных шлаках мы описывали только замещение герцинита магнетитом (например, в шлаках Выйского завода [9]).

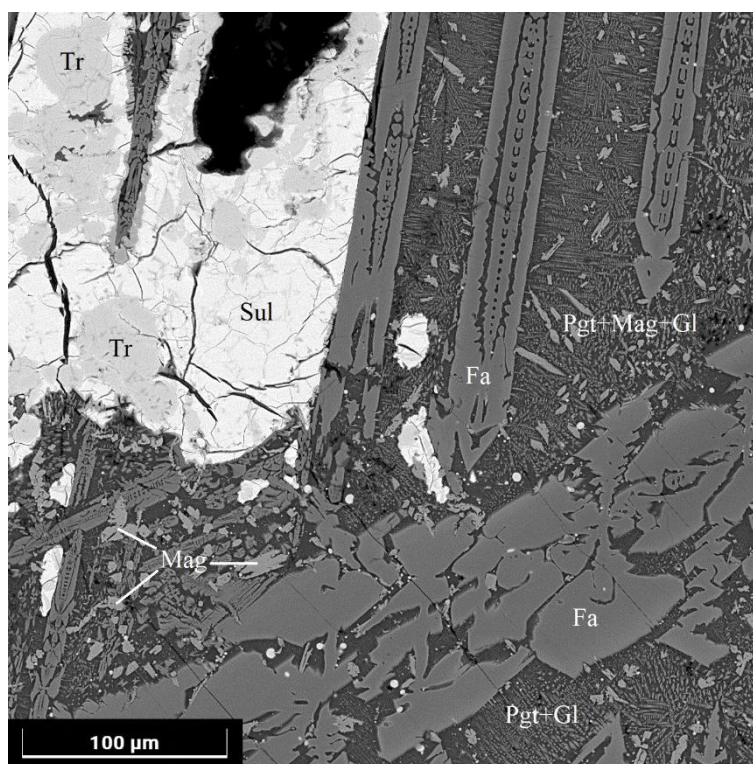


**Рисунок 2.** Внешний вид медного шлака из Нейво-Рудянского завода, сложенный агрегатом фаялита (Fa) с включениями сульфидов (Sul). Здесь и далее, BSE-фото, TESCAN MIRA LMS, S6123 (сделано авторами)

**Герцинит** ( $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ) является редким минералом для шлака (не более 5 об. %), т. к. он отмечается только в виде кайм, мощностью до 10–15 мкм, замещающих кристаллы магнетита. По данным химического состава герцинит имеет вполне однородный состав (табл. 3, ан. 1, 2). Шпинелид характеризуется повышенным содержанием окисного железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до 30,5 мас. %), что по результатам пересчета дает 37 % минала магнетита. При этом в герцините дополнительно отмечаются примеси цинка ( $\text{ZnO}$  до 2,4 мас. %), титана ( $\text{TiO}_2$  до 0,9 мас. %), и ванадия ( $\text{V}_2\text{O}_5$  до 0,5 мас. %). В целом, герцинит является обычным минералом в уральских медных шлаках царского периода [9 и др.] и совсем не характерен для отходов современных медеплавильных заводов [12 и др.].

Сульфидная минерализация в шлаке слагает округлые выделения до 100 мкм и представлена троилитом, борнитом, дигенитом, пентландитом и галенитом.

**Троилит** ( $\text{FeS}$ ) является одним из главных сульфидов в шлаке. Он образует округлые и ксеноморфные скопления в центральной части медных сульфидов, т. е. он кристаллизовался первым из сульфидных минералов. Размер выделений троилита не превышает 200 мкм (рис. 3). По составу он пересчитывается на стехиометрические  $\text{FeS}$  (табл. 4, ан. 1–3). Из примесей содержит только  $\text{Cu}$  (до 1,9 мас. %). В медных шлаках встречается относительно часто, в том числе и в древних отходах металлургии бронзового века [13; 14].



Фаялит — Fa; пирронит — Pgt; стекло — Gl; магнетит — Mag; троилит — Tr; сульфиды — Sul

**Рисунок 3.** Агрегат фаялита и пирронита со скоплениями сульфидов в медном шлаке (сделано авторами)

**Борнит** ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) является главным сульфидом меди в шлаке, он слагает основные массы, размером до 100 мкм. Борнит обычно содержит структуры распада, хорошо видимые в BSE-режиме (рис. 4), а иногда включения троилита (рис. 5). По составу сульфид не содержит примесей и очень близок идеализированной формуле  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  (табл. 4, ан. 4–6). Борнит является вполне типичным сульфидным минералом в древних и современных медных шлаках [12; 15].

**Дигенит** ( $\text{Cu}_9\text{S}_5$ ) образует в виде ламелей, размером до 50 мкм по удлинению, структуры распада в матрице борнита (рис. 4). По составу сульфид хорошо пересчитывается на стехиометрические  $\text{Cu}_9\text{S}_5$  (табл. 4, ан. 7, 8). Из примесей в минерале отмечается только Fe (до 1,9 мас. %). Дигенит вполне характерен для медных шлаков [16 и др.], хотя в них чаще находят близкий ему по составу халькозин [12; 13], в котором содержание серы немного меньше, чем в дигените.

**Пентландит** ( $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ ) образует мелкие включения, размером до 20 мкм, в матрице борнита (рис. 4). Причем наиболее крупные включения приурочены к краевой части медно-железистого сульфида. Пентландит содержит примеси Cu до 3,1 мас. % и Co до 2,1 мас. % (табл. 4, ан. 9, 10). По Ni/Fe отношению [17] сульфид относится к группе железистых пентландитов. В медных шлаках пентландит встречается достаточно редко [15].

Таблица 3

Состав магнетита и герцинита в шлаках Нейво-Рудянского завода (мас. %)

№	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	ZnO	MgO	Сумма
1ц	1,10	0,64	0,40	0,62	11,79	52,90	31,09	0,62	0,94	100,10
1кр	1,23	0,89	0,51	—	32,51	27,85	34,64	2,35	—	99,98
2ц	1,27	0,98	0,39	0,94	13,91	49,69	31,61	0,77	1,05	100,61
2кр	1,85	0,60	0,42	—	30,48	30,47	34,87	2,18	—	100,87
3	1,86	1,16	0,31	0,35	9,94	53,70	30,52	0,39	1,26	99,49
4	1,53	1,15	0,19	0,38	9,98	54,64	30,64	0,44	1,32	100,27
Кристаллохимические формулы										
1ц	$(\text{Fe}_{0.93}\text{Mg}_{0.05}\text{Zn}_{0.02})_{1.00}(\text{Fe}_{1.41}\text{Al}_{0.50}\text{Si}_{0.04}\text{Ti}_{0.02}\text{Cr}_{0.02}\text{V}_{0.01})_{2.00}\text{O}_4$									
1кр	$(\text{Fe}_{0.94}\text{Zn}_{0.06})_{1.00}(\text{Al}_{1.25}\text{Fe}_{0.68}\text{Si}_{0.04}\text{Ti}_{0.02}\text{V}_{0.01})_{2.00}\text{O}_4$									
2ц	$(\text{Fe}_{0.93}\text{Mg}_{0.05}\text{Zn}_{0.02})_{1.00}(\text{Fe}_{1.31}\text{Al}_{0.58}\text{Si}_{0.04}\text{Ti}_{0.03}\text{Cr}_{0.03}\text{V}_{0.01})_{2.00}\text{O}_4$									
2кр	$(\text{Fe}_{0.95}\text{Zn}_{0.05})_{1.00}(\text{Al}_{1.17}\text{Fe}_{0.74}\text{Si}_{0.06}\text{Ti}_{0.02}\text{V}_{0.01})_{2.00}\text{O}_4$									
3	$(\text{Fe}_{0.92}\text{Mg}_{0.07}\text{Zn}_{0.01})_{1.00}(\text{Fe}_{1.46}\text{Al}_{0.42}\text{Si}_{0.07}\text{Ti}_{0.03}\text{Cr}_{0.01}\text{V}_{0.01})_{2.00}\text{O}_4$									
4	$(\text{Fe}_{0.92}\text{Mg}_{0.07}\text{Zn}_{0.01})_{1.00}(\text{Fe}_{1.48}\text{Al}_{0.42}\text{Si}_{0.05}\text{Ti}_{0.03}\text{Cr}_{0.01}\text{V}_{0.01})_{2.00}\text{O}_4$									

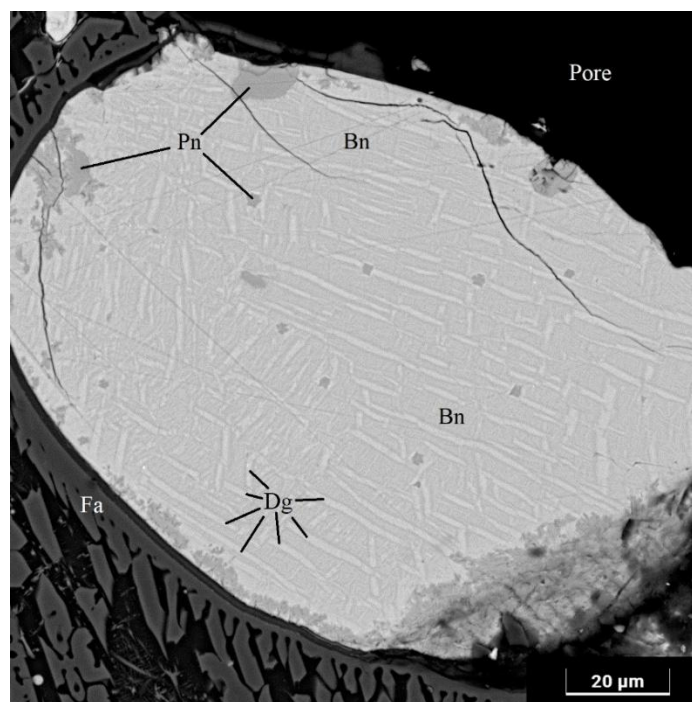
ан. 1ц, 2ц, 3-4 — магнетит; ан. 1кр, 2кр — герцинит. Составлено авторами

**Галенит** (PbS) образует включения в сульфидных скоплениях, размером не более 2–3 мкм. Химический состав галенита определить сложно, т. к. размер зерен меньше толщины электронного пучка, но сульфид уверенно диагностируется по основным пикам свинца и серы. Галенит является вполне типичным сульфидным минералом в медных шлаках [12 и др.]. Температура плавления/кристаллизации сульфида свинца оценивается в пределах 1 096°C [18], что можно принять как температуру образования данных медных шлаков.

**Медь** (Cu) образует тонкие проволочки и небольшие скопления, размером до 20–30 мкм, в сульфидной матрице (рис. 5). По химическому составу медь достаточно чистая, из примесей отмечаются только железо (до 6,1 мас. %, большая часть анализов лежит в пределах 3,6–4,8 мас. %) и сера (в пределах 2,7–5,4 мас. %).

Из вторичных минералов в медном шлаке установлены малахит (корочки на поверхности шлака), барит (мелкие скопления в стекле и пустотах) и гипс (радиально-лучистые агрегаты в пустотах).

В целом, полученные нами результаты химического, микроэлементного и минерального состава отобранного материала позволяют относить изученные шлаки к медеплавильному производству, который и осуществлялся на Нейво-Рудянском заводе в начале XIX века. Судя по обилию сульфидов в шлаках, для плавки использовались колчеданные руды, которые добывались на рудниках близ завода. По литературным данным [5–7] — это Алексеевский, Ежовский, Иоанна-Предтеченский и другие небольшие безымянные медные рудники. В качестве флюса использовались кварцевый песок из речных отложений и известняк, залежи которого выходят на территории поселка.



Фаялит — Fa; борнит — Bn; дигенит — Dg; пентландит — Pn; пустота — Pore

Рисунок 4. Сульфидная сферула в медном шлаке (сделано авторами)

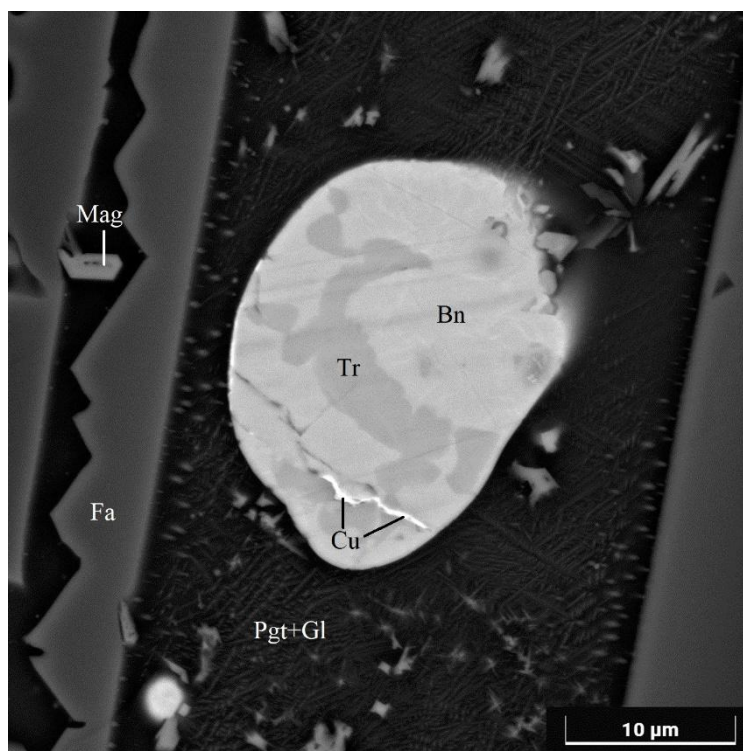
Таблица 4

**Химический состав сульфидов в шлаках Нейво-Рудянского завода (мас. %)**

№	Fe	S	Cu	Co	Ni	Кристаллохимические формулы
троилит						
1	62,12	36,41	1,47	—	—	$(\text{Fe}_{0.98}\text{Cu}_{0.02})_{1.00}\text{S}_{1.00}$
2	61,61	36,45	1,94	—	—	$(\text{Fe}_{0.97}\text{Cu}_{0.03})_{1.00}\text{S}_{1.00}$
3	61,94	36,62	1,44	—	—	$(\text{Fe}_{0.98}\text{Cu}_{0.02})_{1.00}\text{S}_{1.00}$
борнит						
4	11,30	25,39	63,41	—	—	$\text{Cu}_{5.01}\text{Fe}_{1.02}\text{S}_{3.97}$
5	11,42	25,57	63,01	—	—	$\text{Cu}_{4.97}\text{Fe}_{1.03}\text{S}_{4.00}$
6	10,78	25,62	63,60	—	—	$\text{Cu}_{5.02}\text{Fe}_{0.97}\text{S}_{4.01}$
дигенит						
7	4,69	22,57	72,75	—	—	$(\text{Cu}_{8.29}\text{Fe}_{0.61})_{8.90}\text{S}_{5.10}$
8	3,48	22,46	74,06	—	—	$(\text{Cu}_{8.46}\text{Fe}_{0.45})_{8.91}\text{S}_{5.09}$
пентландит						
9	34,28	33,38	3,13	2,09	27,12	$(\text{Fe}_{4.74}\text{Ni}_{3.57}\text{Cu}_{0.38}\text{Co}_{0.27})_{8.96}\text{S}_{8.04}$
10	34,58	33,46	2,15	1,77	28,04	$(\text{Fe}_{4.78}\text{Ni}_{3.68}\text{Cu}_{0.26}\text{Co}_{0.23})_{8.95}\text{S}_{8.05}$

Составлено авторами

Изученные шлаки можно пускать на вторичную переработку. Во-первых, из них можно выделить сульфидный концентрат (с помощью флотации), который дополнительно содержит и металлическую медь. Медь и попутные халькофильные элементы могут быть излечены и методом кучного выщелачивания, широко применяемым сегодня на горнодобывающих предприятиях мира. Во-вторых, с помощью магнитной сепарации можно выделить магнетит-герцинитовый концентрат, который содержит ценные компоненты в виде титана, хрома, ванадия и цинка, а также и фаялитовый концентрат. Последний минерал, как содержащий 53–61 % FeO, является потенциальной железной рудой. К сожалению, технологии добычи железа из силикатов в нашей стране пока нерентабельны, но со временем они вполне могут стать окупаемыми.



медь — Cu; борнит — Bn; троилит — Tr; агрегат пироксена со стеклом — Pgt+Gl; фаялит — Fa; магнетит — Mag

**Рисунок 5.** Самородная медь в сферуле сульфида в медном шлаке (сделано авторами)

Оценить количество шлаков, оставшихся в результате почти 40-летней работы Нейво-Рудянского медеплавильного завода, достаточно сложно. На данный момент на месте бывшего предприятия шлакоотвала нет. При этом шлаки можно легко найти на дороге, отсыпанной через Рудянский пруд. Вполне вероятно, что медные шлаки и пошли на отсыпку этой дороги. Для оценки этого необходимо провести дополнительные трудоемкие работы (бурение или шурфовка), которые позволят доказать присутствие здесь медных шлаков. Зачем это надо? Во-первых, будет околонтурен медный шлакоотвал вполне пригодный для вторичной переработки. Во-вторых, извлечение медных шлаков улучшит экологию Рудянского пруда, а значит и самого поселка Нейво-Рудянка. Судя по присутствию вторичной минерализации в изученных нами шлаках, химическое разложение (в первую очередь сульфидной вкрапленности) уже идет и в воду Рудянского пруда попадают не только медь, но и цинк, никель, кобальт, ванадий, хром, а также свинец. К сожалению, экологическое изучение Рудянского пруда не проводится (по крайней мере, по открытым источникам информации), хотя высокий уровень его загрязнения ни для кого не секрет. Учитывая недалекое расположение (непосредственно выше по течению р. Нейва) АО «Уральского электрохимического комбината», который занимается переработкой радиоактивных отходов, отсутствие здесь экологического мониторинга выглядит как минимум странно. Надеемся, что экологи все же проведут геохимическое исследование воды и донных осадков Рудянского пруда. Если в пробах будут найдены превышения по халькофильным элементам, то это будет косвенным доказательством, что дорога на пруду была отсыпана медными шлаками.

## Выводы

Таким образом, впервые изучена минералогия медных шлаков Нейво-Рудянского завода, который выплавлял медь в период с 1810 по 1849 гг. Установлено, что медные шлаки сложены оливиновым (фаялитом) агрегатом с присутствием пироксена, магнетита, герцинита,

стекла, металлической меди и сульфидной минерализации (троилита, борнита, дигенита, пентландита и галенита). Вторичная минерализация представлена малахитом, баритом и гипсом. Изученные шлаки образовались в результате медеплавильного производства, в качестве сырья использовались сульфидные руды, которые добывались на близлежащих к заводу рудниках. Температура образования шлаков оценивается около 1 096°C. Изученные шлаки можно пускать на вторичную переработку. Из них можно получить медно-сульфидный, герцинит-магнетитовый и фаялитовый концентраты, которые могут далее использоваться в металлургическом переделе. Изученные шлаки, по всей видимости, несут экологическую угрозу Рудянскому пруду и самому поселку Нейво-Рудянка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Sanchez M. Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management / M. Sanchez, M. Sudbury — DOI: 10.2298/JMMB120814011S // Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. — 2013. — Т. 49. — С. 161–168.
2. Lohmeier S. Copper slag as a potential source of critical elements — a case study from Tsumeb, Namibia / S. Lohmeier, B.G. Lottermoser, T. Schirmer, D. Gallhofer — DOI: 10.17159/2411-9717/1383/2021 // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — 2021. — Т. 121. — С. 129–142.
3. Artemyev D.A. Mineralogy and origin of slags from the 6th kurgan of the Taksay 1 burial complex, Western Kazakhstan / D.A. Artemyev, M.N. Ankushev, I.A. Blinov, V.A. Kotlyarov, Ya.A. Lukpanova — DOI: 10.3749/canmin.1800025. // Canadian Mineralogist. — 2018. — Т. 56. — С. 883–904.
4. Pekov I.V. 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 / I.V. Pekov, N.V. Chukanov, A.E. Zadov, P. Voudouris, A. Magganas, A. Katerinopoulos — DOI: 10.3190/jgeosci.099. // Journal of Geosciences. — 2011. — Т. 56, № 3. — С. 249–255.
5. Ярцов А.С. Российская горная история. Уральская часть / А.С. Ярцов. — Екатеринбург: Издательский дом «Баско», 2019. — Кн. 2. — 295 с.
6. Тупиков И.Н. История медеплавильного завода в пос. Нейво-Рудянка (Свердловская область) / И.Н. Тупиков // Геоархеология и археологическая минералогия-2022: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. — Миасс-Челябинск: Издательство ЮУрГГПУ, 2022. — С. 175–179. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49424785> (дата обращения: 22.08.2025).
7. Торопов А.Н. Уральский заводовладелец Иван Саввич Яковлев / А.Н. Торопов // Региональные столицы России — точки опоры и роста: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. — Екатеринбург: Альфа Принт, 2023. — С. 361–363.
8. Металлургические заводы Урала XVII–XX вв. / под ред. В.В. Алексева. — Екатеринбург: Академкнига, 2011. — 536 с.
9. Ерохин Ю.В. Минералогия медных шлаков Выйского завода / Ю.В. Ерохин, В.С. Пономарев, А.В. Захаров, Л.В. Леонова — DOI: 10.19110/geov.2025.5.4 // Вестник геонаук. — 2025. — № 5(365). — С. 29–35.

10. Ерохин Ю.В. Вещественный состав шлаков Карабашского медеплавильного завода / Ю.В. Ерохин, А.В. Захаров, Л.В. Леонова — DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова. — 2019. — Т. 17, № 3. — С. 12–18.
11. Береговский В.И. Metallurgy of copper and nickel / В.И. Береговский, Б.Б. Кистяковский. — М.: Metallurgy, 1971. — 456 с.
12. Nasab M.S. Mineralogical properties of the copper slags from the Sar Cheshmeh smelter plant, Iran / M.S. Nasab, S.B. Bafti, M.R. Yarahmadi, M.M. Maymand, K.J. Khorasani — DOI: 10.3390/min12091153 // Minerals. — 2022. — Т. 12. — С. 1153.
13. Artemyev D.A. Trace elements of Cu-(Fe)-sulfide inclusions in Bronze Age copper slags from South Urals and Kazakhstan: ore sources and alloying additions / D.A. Artemyev, M.N. Ankushev — DOI: 10.3390/min9120746 // Minerals. — 2019. — Т. 9. — С. 746.
14. Ерохин Ю.В. Минералогия медных шлаков Сысертского железодобывающего завода, Средний Урал / Ю.В. Ерохин, В.С. Пономарев, А.В. Захаров, Л.В. Леонова — DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-3 // Минералогия. — 2023. — Т. 9, № 2. — С. 30–40.
15. Wenk H.-R. Slags as evidence for copper mining above Casaccia, Val Bregaglia (Central Alps) / H.-R. Wenk, R. Yu, N. Tamura, D. Bischoff, W. Hunkeler — DOI: 10.3390/min9050292 // Minerals. — 2019. — Т. 9. — С. 292.
16. Ерохин Ю.В. Минералогия медных шлаков из Уктусского металлургического завода / Ю.В. Ерохин, А.В. Захаров, П.Б. Ширяев, Н.Н. Фаррахова — DOI: 10.18522/1026-2237-2025-1-80-87 // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2025. — № 1. — С. 80–87.
17. Шишкин Н.Н. О классификации минералов группы пентландита / Н.Н. Шишкин, А.М. Карпенков, Э.А. Кулагов, Г.А. Митенков // Доклады АН СССР. — 1974. — Т. 217, № 1. — С. 194–197.
18. Самсонов Г.В. Сульфиды / Г.В. Самсонов, С.В. Дроздова. — М.: Metallurgy, 1972. — 304 с.

### **Erokhin Yuriy Viktorovich**

The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yekaterinburg, Russia  
E-mail: [Erokhin-yu@yandex.ru](mailto:Erokhin-yu@yandex.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0577-5898>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=66412](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=66412)

### **Tupikov Ilya Nikolaevich**

Secondary Educational School No. 9, Neivo-Rudyanka settlement, Russia  
E-mail: [tupikov.ilya@mail.ru](mailto:tupikov.ilya@mail.ru)

### **Shiryaev Pavel Borisovich**

The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yekaterinburg, Russia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3090-6001>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=897248](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=897248)

## **Copper slags of the Neivo-Rudyansky plant (material composition and geocology)**

**Abstract.** The article examines the material composition and geocology of copper slags from the Neivo-Rudyansky plant, which operated from 1810 to 1918, around which the modern settlement of Neivo-Rudyanka (Middle Urals, Sverdlovsk Region) gradually grew. At the same time, the plant was initially built as a copper smelter and was engaged in copper smelting from 1810 to 1849 (we established this fact based on archival documents). Until recently, it was believed that the Neivo-Rudyansky plant was exclusively an iron smelter and ironworks. The material composition of the studied samples was obtained using scanning electron microscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry, and X-ray spectral analysis. It has been established that the slags are composed of olivine (fayalite) aggregate with the presence of pyroxene, magnetite, hercynite, glass, metallic copper and sulfide mineralization (troilite, bornite, digenite, pentlandite and galena). Secondary mineralization is represented by malachite, barite and gypsum. The studied slags are waste from copper smelting production, and sulfide ores mined in mines near the plant were used as raw materials. These slags can be completely processed, namely, copper-sulfide, hercynite-magnetite and fayalite concentrates can be obtained from them, which can then be used in metallurgical processing. The studied slags, in all likelihood, pose an environmental threat to the Rudyansky pond and the village of Neivo-Rudyanka itself, because were poured directly into the pond for the road (Rudyansky pond is divided in half by a dirt road with slag inclusions).

**Keywords:** Middle Urals; Neivo-Rudyansky plant; copper slags; mineralogy; geochemistry; geocology; copper; fayalite; sulfides