



## ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-08-142>

УДК 550.8

**Вещественный состав магнитных фракций хвостов флотации медеплавильных шлаков**А. Л. Котельникова , Е. С. Золотова  

Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

 [zolotova@igg.uran.ru](mailto:zolotova@igg.uran.ru)**Аннотация**

Тонкоизмельченные отходы флотационной переработки отвальных медеплавильных шлаков отражательной плавки Среднеуральского медеплавильного завода («технические пески СУМЗ») накоплены в значительных объемах и могут представлять опасность для окружающей среды как потенциальный источник тяжелых металлов. В то же время они могут рассматриваться как перспективный источник полезных компонентов вследствие относительно высокого содержания цинка (3,3–3,9%) и меди (0,4–0,5%). Разработка технологий по утилизации «технических песков» является перспективной задачей цветной металлургии и невозможна без их всестороннего исследования. Целью наших исследований являлись изучение вещественного состава магнитных фракций «технических песков СУМЗ» и оценка перспектив извлечения полезных компонентов (цинка и меди) из хвостов флотации с использованием мокрой магнитной сепарации. Химический анализ полученных фракций выполнен в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре Elan-9000. Фазовый анализ выполнен в центре коллективного пользования «Урал–М» Института металлургии УрО РАН методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance. Магнитные свойства фракций магнитной сепарации изучены методом термомагнитного анализа. После обработки отхода методом мокрой магнитной сепарации выход магнитной фракции (48 кА/м) составил приблизительно 83%, слабомагнитной (200 кА/м) – 11%, немагнитной – 6%. Получены данные о фазовом и химическом составе фракций магнитной сепарации отхода. Отмечено, что цинк и медь распределяются по фракциям относительно равномерно с несколько повышенным содержанием меди в немагнитной, а цинка – в слабомагнитной фракции. Подтверждена зависимость магнитной восприимчивости минералов «технических песков» от наличия в них изоморфных примесей. Совместная оценка данных рентгенофазового и термомагнитного анализов показала, что при практически идентичных рентгенограммах термомагнитные кривые в интервале 20–700 °С демонстрируют существенные различия фракций магнитной сепарации. Все полученные термомагнитные кривые необратимые. При использованных параметрах мокрой магнитной сепарации для разделения «технических песков» данный метод малоэффективен, необходимы дополнительные исследования по поиску оптимальных способов подготовки отходов и режимов напряженности магнитного поля. Результаты исследований вносят вклад в изучение магнитных свойств отходов переработки медеплавильных шлаков, представляют интерес для разработки новых схем их утилизации и повторной переработки.

**Ключевые слова**

медеплавильное производство, минеральные отходы, медеплавильные шлаки, хвосты флотационной переработки, утилизация, магнитная сепарация, термомагнитный анализ, магнитные фракции, магнитные свойства, фаялит ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), форстерит ( $(\text{MgMn})\text{SiO}_4$ ), диопсид ( $\text{CaZn}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), сфалерит ( $\text{ZnS}$ ), цинкит ( $\text{ZnO}$ )

**Благодарности**

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № 123011800011-2. Эта работа стала возможной благодаря деятельному участию в ней Сергея Григорьевича Комлева, специалиста в области обогащения полезных ископаемых, и Виктора Сергеевича Иванченко, известного ученого в области магнитометрии. Светлой их памяти авторы посвящают эту статью. Авторы выражают глубокую признательность В. Ф. Рябинину, инициатору геоэкологических исследований в Институте геологии и геохимии УрО РАН, за помощь в проведении исследований, Д. В. Киселевой и Д. С. Реутову за помощь в проведении аналитических работ.

**Для цитирования**

Kotelnikova A. L., Zolotova E. S. Material composition of magnetic fractions of copper-smelting slag flotation tailings. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):56–66. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-08-142>



## BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

**Material composition of magnetic fractions of copper-smelting slag flotation tailings**A. L. Kotelnikova , E. S. Zolotova  *Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IGG UB RAS),  
Yekaterinburg, Russian Federation* [zolotova@igg.uran.ru](mailto:zolotova@igg.uran.ru)**Abstract**

Finely ground tailings from flotation processing of waste copper reverberatory smelting slags of the Sredneuralsky Copper Smelter (“SUMZ technical sands”) was accumulated in significant amounts and may pose a threat to the environment as a potential source of heavy metals. At the same time, the waste can be considered as a promising source of useful components due to relatively high contents of zinc (3.3–3.9%) and copper (0.4–0.5%). Development of technologies for recycling the “technical sands” is a promising task of nonferrous metallurgy and requires their comprehensive study. The purpose of this research was to study the material composition of magnetic fractions of the “SUMZ technical sands” and assess the prospects of extraction of useful components (zinc and copper) from their flotation tailings using wet magnetic separation. Chemical analyses of the obtained fractions were carried out at the Center for Collective Use “Geoanalitik” of the Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS by inductively coupled plasma mass spectrometry method using an Elan-9000 quadrupole mass spectrometer. Phase analyses were carried out at the Ural-M Collective Use Center of the Institute of Metallurgy, UB RAS by X-ray phase analysis using a Bruker D8 Advance diffractometer. The magnetic properties of the magnetic separation fractions were studied by thermomagnetic analysis. After treating the tailings by wet magnetic separation, the yield of the magnetic fraction (48 kA/m) was approximately 83%, that of the weakly magnetic fraction (200 kA/m) was 11%, and that of the non-magnetic fraction, 6%. The data on the phase and chemical composition of the tailings magnetic separation fractions were obtained. It was found that zinc and copper were distributed relatively uniformly among the fractions with a slightly higher content of copper in the non-magnetic fraction and that of zinc in the weakly magnetic fraction. The dependence of magnetic susceptibility of the “technical sands” minerals on the presence of isomorphous impurities in them was confirmed. The joint evaluation of the data of X-ray phase and thermomagnetic analyses showed that at practically identical X-ray diffraction patterns the thermomagnetic curves in the range of 20–700°C demonstrate significant differences between the magnetic separation fractions. All the obtained thermomagnetic curves are irreversible. At the used parameters of wet magnetic separation, this method proved inefficient for the “technical sands” separation, and additional research is required to find optimal methods of the tailings pretreatment and magnetic intensity modes. The research findings contribute to the study of magnetic properties of copper-smelting slag processing tailings and are of interest for the development of new flow schemes for their utilization and recycling.

**Keywords**

copper smelting production, mineral waste, copper smelting slag, flotation processing tailings, recycling, magnetic separation, thermomagnetic analysis, magnetic fractions, magnetic properties, fayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), forsterite ( $(\text{MgMn})\text{SiO}_4$ ), diopside ( $\text{CaZn}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ ), magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), sphalerite ( $\text{ZnS}$ ), zincite ( $\text{ZnO}$ )

**Acknowledgments**

The research was carried out within the framework of the State Assignment of IGG UB RAS, project No. 123011800011-2.

This work was made possible by the active participation of Sergey Grigorievich Komlev, a specialist in the field of mineral processing, and Victor Sergeevich Ivanchenko, a well-known scientist in the field of magnetometry. This paper is for their cherished memory.

The authors express profound gratitude to V. F. Ryabinin, the initiator of geoecological research at the Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, for help in conducting the research, and to D. V. Kiseleva and D. S. Reutov for assistance in assaying.

**For citation**

Kotelnikova A. L., Zolotova E. S. Material composition of magnetic fractions of copper-smelting slag flotation tailings. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):56–66. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-08-142>



## Введение

Отходы горно-металлургической промышленности занимают огромные территории по всему миру и наносят существенный экологический урон [1–3]. Особую опасность для окружающей среды представляют отходы цветной металлургии из-за высокого содержания тяжелых металлов [4–6].

В настоящее время на медеплавильных производствах для переработки шлаков чаще всего используется метод флотации [7–9], в результате чего получают концентрат медьсодержащих компонентов и образуются хвосты обогащения – «технические пески», представляющие собой тонкодисперсный, механоактивированный материал. Данные отходы находят ограниченное применение в строительной области [10] и для рекультивации нарушенных территорий [11, 12], ведутся разработки применения хвостов флотации медеплавильных шлаков для очистки промышленных сточных вод [13]. Однако по большей части отходы направляются на захоронение и сейчас накоплены в значительных объемах в районах деятельности медеплавильных комбинатов. «Технические пески» могут вызывать загрязнение подземных и надземных вод, почвы, а также растений [14, 15].

Хвосты флотации медеплавильных шлаков можно рассматривать как потенциальный источник полезных компонентов [16, 17]. Разработка и внедрение технологий, предусматривающих переработку и утилизацию техногенных отходов, крайне актуальная задача для современных производств, устойчивого природопользования и сохранения окружающей среды [18–20]. Решение проблемы комплексного использования хвостов флотации медеплавильных шлаков требует их всестороннего исследования.

Уральский и сибирский регионы являются одними из главных производственных центров цветной металлургии России. В 1994–1995 гг. Среднеуральский медеплавильный завод (ОАО СУМЗ) и ОАО Кировоградский медеплавильный комбинат начали переработку отвалных литых шлаков в качестве источника медно-цинкового концентрата. Наиболее подробно изучен вещественный состав хвостов флотации ОАО СУМЗ [21–23], которых накоплено более 10 млн т. По предварительным оценкам в таком объеме может содержаться около 340 тыс. т цинка, 43 тыс. т меди, 43 тыс. т свинца, а также 3,5 млн т железа. В «технических песках» СУМЗ содержится до 4% цинка и до 0,5% меди. Для их извлечения применим метод кислотного выщелачивания. Максимальное извлечение цинка (до 77%) и меди (до 64%) было достигнуто с использованием серной кислоты (концентрация 300 г/дм<sup>3</sup>) [24]. Увеличение степени извлечения цинка и меди возможно с учетом фазового состава «технических песков», распределения их по минеральным фазам, а также тонины помола [25] и магнитных свойств отхода.

В литературе встречаются исследования по извлечению ценных компонентов из медеплавильных шлаков методом магнитной сепарации [25, 26]. На примере хвостов флотации конвертерных медеплавильных шлаков обогатительной фабрики ОАО «Святогор» установлено, что изменение напряженности магнит-

ного поля (1200, 800, 400 Э) при мокрой магнитной сепарации, крупности измельчения и способа охлаждения шлака практически не влияет на содержание железа в получаемом железном концентрате [25]. Китайскими учеными был предложен совместный процесс прямого восстановления и магнитной сепарации хвостов флотации медеплавильных шлаков с использованием известняка [26]. Однако минеральному составу получаемых магнитных фракций отхода уделено недостаточно внимания.

Целью наших исследований являлись изучение вещественного состава магнитных фракций отходов переработки отвалных литых шлаков Среднеуральского медеплавильного завода и оценка перспектив извлечения полезных компонентов (цинка и меди) из хвостов флотации с использованием мокрой магнитной сепарации. В связи с этим решались следующие задачи: фракционирование хвостов переработки медеплавильных шлаков СУМЗ методом мокрой магнитной сепарации; определение химического и фазового состава полученных магнитных фракций; характеристика их магнитных свойств с использованием термомагнитного анализа; оценка эффективности разделения хвостов флотации методами мокрой магнитной сепарации.

## Объекты и методы исследования

Литой отвалный шлак отражательной плавки Среднеуральского медеплавильного завода при переработке подвергается измельчению сначала на конусных дробилках до фракции 10 мм, затем на шаровых мельницах до 0,05 мм. Последующее извлечение медного концентрата проводится методом флотации. Жидкий концентрат и хвосты обогащения («технические пески») раздельно проходят радиальные ступи-тели и фильтруются. Для обезвоживания хвостов используются вакуумные фильтры.

«Технические пески СУМЗ» представляет собой тонкодисперсный материал гранулометрического состава: (–0,21 + 0,10) мм – 1,1–4,1%; (–0,1 + 0,05) мм – 21–30%; < 0,05 мм – 69–75%. По химическому составу, масс. %: FeO – 32,3; SiO<sub>2</sub> – 31; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 14,29; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 7,05; CaO – 4,53; Zn – 3,28; MgO – 1,64; S – 1,32; K<sub>2</sub>O – 0,74; Na<sub>2</sub>O – 0,64; As – 0,53; Cu – 0,44; Ba – 0,43; TiO<sub>2</sub> – 0,26; Pb – 0,2; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,1; MnO – 0,09 [23].

Разделение хвостов переработки медеплавильных шлаков СУМЗ на магнитные фракции выполнено на кафедре обогащения полезных ископаемых горно-механического факультета Уральского государственного горного университета. Для выделения магнитных фракций использовался метод мокрой магнитной сепарации<sup>1</sup>, характеризующийся непрерывностью процесса сепарации, которая обеспечивалась созданием в рабочей камере магнитного поля с напряженностью, уменьшающейся в направлении движения пульпы.

<sup>1</sup> Свертков А.А., Чекменев А.Н., Братусь С.В., Шархов В.В. Патент № RU 2013109184 А, Российская Федерация, МПК В03С1/00. Способ мокрой магнитной сепарации магнетитовых руд и устройства для его осуществления: заявл. 2013109184/03, 28.02.2013; опубликовано 10.09.2014.



Определение химического и фазового составов полученных фракций проводилось в центре коллективного пользования «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре Elan-9000 (PerkinElmer, Канада). Фазовый анализ выполнен в центре коллективного пользования «Урал-М» Института металлургии УрО РАН методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance (Bruker AXS GmbH, Германия).

Исследование магнитных свойств «технических песков» проведено в Институте геофизики УрО РАН. Для определения суммарной намагниченности фракций магнитной сепарации использовался метод термомагнитного анализа. Схема установки представлена в монографии [27]. Измерение магнитной восприимчивости образцов проведено серийным капнометром КТ-3.

### Результаты исследований и их обсуждение

«Технические пески СУМЗ» представляют собой тонкодисперсный материал (размеры частиц <0,05 мм), состоящий из смеси фаялита, пироксена, железосодержащей стекловатой фазы кислого и основного состава, магнетита, гематита, вюститита, шпинелидов, сульфидов и интерметаллидов. Магнетит и сульфиды приурочены к стеклофазе. Характерной особенностью «песков» является повышенное содержание цинка (около 3,3–3,9%) и меди (0,4–0,5%) с соотношением  $Zn/Cu = 7,5$ . Цинк присутствует во всех фазах. Силикатный цинк – в фаялите и стеклофазе. Прочие тяжелые металлы, включая медь, преимущественно сосредоточены в сульфидных и интерметаллидах. По литературным данным [25] первичные медные минералы представлены халькопиритом, кубанитом, купритом, которые обычно сопровождаются вторичными минералами меди – ковеллином и борнитом. Суммарная массовая доля медьсодержащих минералов составляет 1,5%. Около 50% железа содержится в фаялите. Основная масса щелочных и щелочноземельных элементов, а также алюминий и кремний заключены в стеклофазе [23].

Магнитные свойства отходов переработки медеплавильных шлаков Среднеуральского медеплавильного завода определяются магнитными свойствами входящих в его состав минералов. Практически все минеральные фазы «технических песков» являются магнетиками, способными намагничиваться в магнитном поле. Это связано с тем, что в их состав, как правило, входят атомы с собственным магнитным моментом, обусловленным наличием неспаренных электронов, например,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ .

Поэтому при наложении магнитного поля разделение «технических песков СУМЗ» оказалось затруднительным. Выход магнитной фракции составил 83,27%, слабомагнитной – 10,85%, немагнитной – 5,88% (табл. 1).

Кроме того, значительное влияние на разделение хвостов флотации медеплавильных шлаков с использованием мокрой магнитной сепарации оказывает

присутствие стекла (до 30 масс. % в шлаках СУМЗ). Для шлаков медной плавки завода «Карабашмедь» установлено, что дробление в аппаратах центробежно-ударного действия – дезинтеграция – происходит с низкой степенью селективности из-за стекловатой структуры [28].

Условия остывания литого медеплавильного шлака, служащего исходным материалом исследуемых «технических песков», заметно отличаются от природных. Как следствие, гомогенизированные индивиды минералов представляют меньшую часть объема. Преобладающая часть отхода представлена в разной степени раскристаллизованным стеклом [23, 29]. В обломочном материале «технических песков СУМЗ» количественно доминирует мелкообломочное стекло, представляющее собой фрагменты формирующихся минералов на разных стадиях гомогенизации их состава. Стекло выполняет интерстиции между индивидами оливина, магнетита и сульфидов. Состав стекла (по зондовым анализам) имеет 30–50% кремнезема, глинозема от 7 до 20%, щелочей до 10%, цинка 1,5–10%, меди до 1% и до 30% оксидов железа [30]. Наличие сложных скрытокристаллических структур, присутствие структур распада твердых растворов, структур замещения элементов в кристаллической структуре минералов в виде каемок на периферии зерен снижает степень селективной дезинтеграции шлака при дроблении.

Химический анализ полученных магнитных фракций «технических песков СУМЗ» (табл. 2) показал, что цинк и медь распределяются по фракциям относительно равномерно. Отмечено некоторое увеличение содержания меди в немагнитной, а цинка в слабомагнитной фракции.

В отходах переработки медеплавильных шлаков согласно предыдущим исследованиям наблюдается фаза цинкового магнетита [21, 23]. Данный факт можно расценивать как одно из проявлений незавершившейся гомогенизации минерала. Можно предположить, что с этим и связано увеличение содержания цинка в слабомагнитной фракции. Присутствие цинка отмечалось и в вюстите, уступающем в количестве магнетиту в «технических песках», но также содержащем определенное количество цинка.

Медь остается преимущественно в немагнитной фракции, скорее всего, из-за наличия в стекле эмульсионной вкрапленности штейна [23] и медьсодержащих минералов [25].

Таблица 1

Результаты разделения отходов переработки медеплавильных шлаков методом мокрой магнитной сепарации

Фракция	Напряжённость магнитного поля, кА/м	Масса, г	Выход, %
Магнитная	48	119,52	83,27
Слабомагнитная	200	15,57	10,85
Немагнитная	–	8,44	5,88
Всего	–	143,53	100,00



Минеральной основой «технических песков» являются силикаты (около 84 %), представленные оливинами, пироксенами и стеклофазой. Второстепенными фазами являются оксиды железа и цветных металлов (около 14 %), сульфиды (около 2 %) (табл. 3). В небольшом количестве присутствуют интерметаллиды.

Указанные количества минеральных фаз (см. табл. 3) имеют соответствующую кристаллическую решетку. Однако, следует отметить, что большинство минералов «технических песков» еще не достигло полной гомогенизации. Особенностью большинства минеральных фрагментов в обломочном материале отхода являются заметные отклонения от стехиометрических составов.

По данным рентгенофазового анализа оливины в «технических песках СУМЗ» имеют преимущественно фаялитовый состав ( $\text{Fe}_{1,64}\text{Ca}_{0,04}\text{Zn}_{0,15}(\text{Si}_{0,85}\text{Al}_{0,27})\text{O}_4$ ). Исследования магнитных свойств оливинов [31, 32] показали, что при низких температурах в них происходит антиферромагнитное упорядочение, причем магнитная ячейка совпадает с кристаллографической.

Пироксены в «технических песках СУМЗ» представляют собой ферросилиты состава ( $\text{Fe, Mg, Ca, Zn})_2\text{Si}_{1,9}\text{O}_{6,0}$  с примесями Al. Ранее отмечалось, что в отвальных шлаках иногда встречаются индивиды авгита ( $\text{Ca, Fe, Mg}[\text{SiO}_3]_2$ ) [33]. В кристаллической решетке пироксенов нередко обнаруживаются катионы трехвалентного железа и меди.

Основные скопления магнетита, сульфидов, оксидов цветных металлов и интерметаллидов сосредоточены в стекловатой фазе «технических песков». Зерна этих минералов хорошо ограненные, различной размерности, в том числе и нанокристаллические. Магнетит образует также сложные типы сростков с фаялитом. Чистый магнетит в хвостах флотации встречается редко, его состав можно представить структурной формулой ( $\text{Fe}_{2,8}\text{Al}_{0,5}\text{Si}_{0,1}\text{Zn}_{0,1}\text{O}_4$ ). Часто

в его состав входит медь, эпизодически определяются катионы Cr, Ti, Cd, Sn. Магнетит – типичный ферромагнетик [34]. Кристаллы и зерна магнетита сами по себе являются природными постоянными магнитами, имеющими силу и полярность настоящего магнита. Но присутствие в составе магнетита изоморфных примесей будет снижать магнитную восприимчивость.

В «технических песках СУМЗ» определяются вюстит ( $\text{Fe}_{0,9}\text{Al}_{0,02}\text{Si}_{0,01}\text{Zn}_{0,04}\text{O}$ ) и гематит ( $\text{Fe, Al, Si}_{0,4}\text{O}_3$ ), иногда с примесями Zn и Sn. Это антиферромагнитные минералы, магнитная восприимчивость которых небольшая, но положительная [35]. При наложении магнитного поля изоморфные примеси будут оказывать существенное влияние на магнитную восприимчивость этих минералов.

Пирротиноподобные сульфиды в «технических песках» имеют следующие составы: ( $\text{Pb, Fe, Cu, Zn, Si}_{0,08}\text{Sn}_{0,07}\text{S}$ ),  $\text{FeS}\cdot\text{Cu}_2\text{S}$ , ( $\text{Pb, Fe, Cu})_{1,06}\text{S}$ , ( $\text{Pb, Fe, Si}_{0,44}\text{Ca}_{0,18}\text{S}$ ). Чистый пирротин является ферромагнетиком [36]. Так же как магнетит, он имеет собственный магнитный момент и способен создавать вокруг себя магнитное поле.

Диамagnetики в «технических песках СУМЗ» представлены металлической медью, сурмянистыми интерметаллидами, сульфидами – халькозином и сфалеритом, купритом и цинкитом, ангидритом состава ( $\text{Ca}_{0,74}\text{Ca, Na, Al, Mg}\text{SO}_4$ ), гидроксидами алюминия и кремния.

В магнитной фракции сосредоточено 96 % магнетита, более 80 % силикатной и сульфидной фазы (табл. 4). Такое распределение вещества может быть связано с тонкой вкрапленностью магнитных минералов в стеклофазе и образованием сростков с силикатами, а также с изменением магнитной структуры минеральных фаз, возникающим при наличии изоморфных примесей в кристаллической структуре минералов при наложении магнитного поля.

Таблица 2

Данные химического анализа магнитных фракций отходов переработки медеплавильных шлаков, масс. %

Фракция	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cu	Zn	Pb	As	Fe <sub>общ</sub>
Исходные «пески»	32,4	2,9	0,04	4,39	0,98	0,05	0,18	1,17	0,06	0,07	35,5
Магнитная	32,4	3,1	0,04	4,54	1,01	0,05	0,19	1,20	0,07	0,07	37,8
Слабомагнитная	35,2	3,3	0,04	5,15	1,28	0,06	0,15	1,36	0,07	0,06	34,8
Немагнитная	37,2	3,9	0,05	5,01	1,71	0,07	0,24	1,20	0,07	0,05	33,1

Таблица 3

Минеральный состав магнитных фракций отходов переработки медеплавильных шлаков по данным рентгенофазового анализа, масс. %

Минералы	Исходные «технические пески СУМЗ»	Магнитная фракция	Слабомагнитная фракция	Немагнитная фракция
Фаялит Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	48,2	51,3	64,6	64,5
Форстерит (MgMn)SiO <sub>4</sub>	15,4	10,0	9,0	10,0
Диопсид CaZn(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	20,4	19,9	19,3	19,6
Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	13,7	15,7	4,1	1,4
Сфалерит ZnS	1,8	1,8	1,9	1,3
Цинкит ZnO	0,5	1,3	1,1	3,2

Наличие в кристаллической решетке силикатов «технических песков» изоморфных катионов, обладающих собственным магнитным моментом, обусловленным наличием неспаренных электронов, например,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ , а также включений магнетита и пирротина приводит к возникновению областей повышенной намагниченности внутри силикатных зерен и тонких агрегатов силикатных минералов и стекла, сохраняющихся после дробления медеплавильного шлака. Поэтому более 80% силикатов сосредотачивается в магнитной фракции.

Концентрирование диамагнетиков в магнитной фракции (см. табл. 4) может объясняться как электростатическим захватом мелких зерен диамагнитных минералов, так и присутствием пылеватых частиц магнетита и/или пирротина, рассеянных в них.

Распределение магнетита по магнитным фракциям зависит от его химического состава, а также от

степени раскрытия сростков с фаялитом и стеклофазой. Чем больше примесей в кристаллической решетке магнетита, тем меньше магнитная восприимчивость. Магнетит был обнаружен даже в немагнитной фракции.

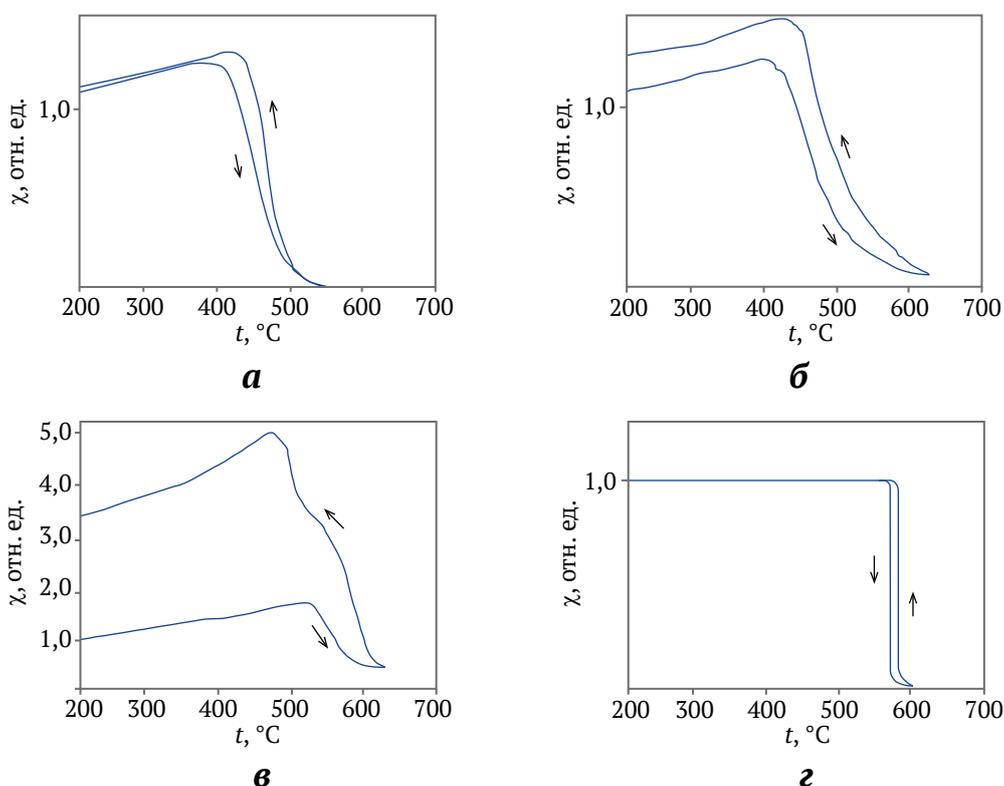
Согласно данным рентгенофазового анализа медь преимущественно сосредоточена в пирротиноподобных сульфидах. Распределение цинка по минеральным фазам следующее: 15–20% от общего содержания цинка приходится на магнетит, 30–35% цинка концентрируется в силикатах (оливин), 20–25% цинка приходится на цинкит, до 20% цинка сосредоточено в сфалерите.

Совместная оценка данных рентгенофазового и термомагнитного анализа хвостов флотации литых отвальных медеплавильных шлаков показала, что при практически идентичных рентгенограммах термомагнитные кривые в интервале 20–700 °С демонстрируют существенные различия фракций магнитной сепарации (рис. 1).

Таблица 4

**Распределение минералов по магнитным фракциям отходов переработки медеплавильных шлаков с учетом весового выхода фракций, масс. %**

Минералы	Магнитная фракция	Слабомагнитная фракция	Немагнитная фракция
Фаялит $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$	79,81	13,09	7,09
Форстерит $(\text{MgMn})\text{SiO}_4$	84,17	9,87	5,94
Диопсид $\text{CaZn}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	83,63	10,57	5,82
Магнетит $\text{Fe}_3\text{O}_4$	96,13	3,27	0,61
Сфалерит $\text{ZnS}$	84,04	11,56	4,29
Цинкит $\text{ZnO}$	77,69	8,56	13,50



**Рис. 1.** Термомагнитограммы: *а* – магнитной фракции «технических песков СУМЗ» (предел измерений 10 мВ); *б* – слабомагнитной фракции (предел измерений 3 мВ); *в* – немагнитной фракции (предел измерений 0,3 мВ); *з* – природного магнетита Абаканского месторождения (предел измерений 10 мВ)



Все полученные термомагнитные кривые необратимые. Магнитные свойства фракций магнитной сепарации «песков» определяются присутствием магнетита и пирротиноподобных сульфидов.

Магнитная фракция при нагреве достигает температуры Кюри в диапазоне от 470 до 520 °С, что свидетельствует о присутствии изоморфного ряда ферромагнитных минералов.

При нагреве слабомагнитной фракции наблюдается повышение магнитной восприимчивости после охлаждения примерно на 20% (температура Кюри – в диапазоне от 420 до 570 °С). При этом на кривой охлаждения заметны два перегиба, один, вероятно, соответствует образовавшемуся в процессе охлаждения магнетиту, другой соответствует примеси исходных ферромагнитных минералов с той же температурой Кюри, что и у сильномагнитной фракции.

При нагреве немагнитной фракции температура Кюри составляла 550 °С, что свидетельствует о некотором присутствии ферромагнитных минералов, при охлаждении произошло образование магнетита, за счет чего магнитная восприимчивость увеличилась примерно в 3 раза.

Прекурсорами магнетита, образовавшегося при охлаждении слабомагнитной и немагнитной фракции, вероятно, являются гидроксиды железа и изоморфно-замещенные ферромагнитные минералы: магнетит и пирротин.

Анализ термограмм показал, что фракции магнитной сепарации содержат достаточно большое количество примесей, значительно снижающих их магнитную восприимчивость и соответственно магнитную силу. Поэтому для более полного разделения «технических песков» требуется увеличение напряженности магнитного поля, возможно, весьма существенное с использованием сверхпроводящих магнитных систем [37].

Таким образом, фазовый состав, магнитные свойства минералов отходов флотации медеплавильных шлаков и их структурные особенности определяют низкую эффективность разделения «технических песков» общепринятыми методами мокрой магнитной сепарации. Для их успешного разделения перед магнитной сепарацией необходима предварительная подготовка материала.

Как известно, существующие схемы обогащения железорудного сырья, основанные на магнитной сепарации и построенные по принципу стадийного выделения отвальных хвостов с получением готового концентрата, только в последней операции применимы и успешно работают на богатом сырье. При обогащении тонко вкрапленных бедных руд возникают проблемы, связанные с уменьшением крупности материала, поступающего на магнитную сепарацию. Максимально полное вскрытие минералов достигается лишь при измельчении до размера вкрапленности зерен извлекаемого минерала, что влечет за собой увеличение как энергетических затрат, так и переизмельчение компонентов рудной смеси, в том числе и уже вскрытых минералов [38].

Ультратонкое измельчение минералов [25] с применением шаровой и бисерной мельницы приводит к разрушению целостности кристаллов и дефектообразованию с появлением рентгеноаморфных слоев, росту их гидратированности и растворимости. Установлено, что сульфидные минералы при механических воздействиях претерпевают такие структурно-химические изменения, как сульфатизация и аморфизация [39].

В процессе измельчения магнетита до 0,04–0,02 мм нарушается его первичная доменная структура, что прежде всего обуславливает рост коэрцитивной силы частиц. Это способствует увеличению флокуляции и захвату во флокулы значительного количества нерудных частиц, что снижает эффективность разделения магнетита и нерудных минералов. В то же время удельная магнитная восприимчивость магнитных частиц размером менее 0,02 мм резко уменьшается, что способствует потере переизмельченного магнетита с хвостами. Также выявлено, что при механической обработке (дроблении, измельчении) дефектность структуры магнетитов возрастает, что ведет к преобразованию магнетита в направлении магнетит-мартит-гематит [40].

Процессы шламо- и дефектообразования снижают селективность разделения. Для снижения негативного влияния этих процессов предлагается введение поверхностно-активных веществ (ПАВ) в измельчительный процесс [39].

Недостатков механического вскрытия можно избежать, применяя высоковольтный импульсный способ вскрытия твердых тел, в том числе стекол [41], который обладает высокой селективностью и эффективностью, а также возможностью регулирования и автоматизации процесса.

Повысить степень селективности разделения можно с помощью винтовой сепарации, которая позволяет выводить из межцикловых операций зерна железосодержащих минералов разной плотности по мере их раскрытия для исключения переизмельчения [42].

### Заключение

Впервые для отходов флотационной переработки отвальных медеплавильных шлаков Среднеуральского медеплавильного завода («технических песков СУМЗ») изучен вещественный состав магнитных фракций и получены термомагнитные кривые. «Технические пески» обладают ярко выраженными магнитными свойствами, так как в их составе присутствуют ферромагнитные минералы и изоморфные примеси – катионы с собственным магнитным моментом в кристаллических решетках минеральных индивидов. В магнитной фракции сконцентрирован магнетит (около 97%). Повышение содержания меди и цинка в немагнитной фракции, вероятно, обусловлено нестехиометричностью оливина, а также наличием микровключений.

Совместная оценка данных рентгенофазового и термомагнитного анализов показала, что при практически идентичных рентгенограммах термомагнитные кривые в интервале 20–700 °С демонстрируют существенные различия фракций магнитной сепара-



ции хвостов флотации медеплавильных шлаков. Все полученные термомагнитные кривые необратимые. Поэтому для более полного разделения фракций магнитной сепарации «технических песков» требуется увеличение напряженности магнитного поля. Мы считаем, что применение термомагнитного анализа для оценки магнитной восприимчивости фракций будет полезным для контроля качества получаемых концентратов на всех стадиях сепарации.

Фазовый состав, магнитные свойства минералов «технических песков» и их структурные особенности: наличие скрытокристаллических структур, сложные типы сростков минералов, присутствие структур распада твердых растворов, структур замещения элементов в кристаллической структуре минералов в виде каемок на периферии зерен – снижают эффективность разделения «технических песков» общепринятыми методами мокрой магнитной сепарации. Для их успешного разделения необходимо проведение дополнительных исследований по поиску оптималь-

ных способов предварительной подготовки отходов и режимов напряженности магнитного поля.

Предварительная подготовка «технических песков» должна включать современные методы дезинтеграции и сепарации труднообогатимых тонковкрапленных бедных руд, например, ультратонкое измельчение с помощью высоковольтных импульсов, винтовая сепарация с выводом из межцикловых операций железосодержащих минералов разной плотности по мере их раскрытия для исключения переизмельчения, использование ПАВ для снижения магнитной сепарации перспективным будет применение высокоградиентной мокрой магнитной сепарации со сверхпроводящей магнитной системой.

Результаты исследований вносят вклад в изучение магнитных свойств отходов переработки медеплавильных шлаков, представляют интерес для разработки новых схем их утилизации и повторной переработки.

### Список литературы / References

1. Bexeitova R., Veselova L., Kassymkanova K.K. et al. The problem of environmental safety of the fields of mining industrial production of arid zone of Kazakhstan. *Geodesy and Cartography*. 2018;44(4):146–155. <https://doi.org/10.3846/gac.2018.4314>
2. Worlanyo A.S., Jiangfeng L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. *Journal of Environmental Management*. 2021;279:111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>
3. Covre W.P., Ramos S.J., da Silveira Pereira W.V. et al. Impact of copper mining wastes in the Amazon: Properties and risks to environment and human health. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;421:126688. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126688>
4. Izydorczyk G., Mikula K., Skrzypczak D. et al. Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management. *Environmental Research*. 2021;197:111050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111050>
5. Jia L., Liang H., Fan M. et al. Spatial distribution characteristics and source appointment of heavy metals in soil in the areas affected by non-ferrous metal slag field in the dry-hot valley. *Applied Sciences*. 2022;12(19):9475. <https://doi.org/10.3390/app12199475>
6. Men D., Yao J., Li H. et al. The potential environmental risk implications of two typical non-ferrous metal smelting slags: contrasting toxic metal(loid)s leaching behavior and geochemical characteristics. *Journal of Soils and Sediments*. 2023;23:1944–1959. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03468-0>
7. Мамонов С.В., Газалеева Г.И., Дресвянкина Т.П. и др. Повышение технологических показателей переработки отвальных шлаков медеплавильного производства на основе их медленного охлаждения и ультратонкого измельчения. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2018;(2):83–90. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-83-90>  
Mamonov S.V., Gazaleeva G.I., Dresvyankina T.P. et al. Improvement of technological indices of copper smelters slags processing on the basis of their slow cooling and ultra-fine grinding. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018;(2):83–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-83-90>
8. Sibanda V., Sipunga E., Danha G., Mamvura T.A. Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal. *Heliyon*. 2020;6(1):e03135. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03135>
9. Zhou H., Liu G., Zhang L., Zhou C. Mineralogical and morphological factors affecting the separation of copper and arsenic in flash copper smelting slag flotation beneficiation process. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;401:123293. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123293>
10. Alp İ., Deveci H., Süngün H. Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. *Journal of hazardous materials*. 2008;159(2–3):390–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.056>
11. Гуман О.М., Долинина И.А., Макаров А.Б., Рудой А.Г. Использование отходов переработки отвальных шлаков для рекультивации земель горнодобывающего комплекса. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2010;(4):43–49.  
Guman O.M., Dolinina I.A., Makarov A.B., Rudoi A.G. The use of waste processing waste slag for land reclamation of the mining complex. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2010;(4):43–49 (In Russ.)



12. Гуман О.М., Макаров А.Б., Вегнер-Козлова Е.О. Техногенные образования как рекультивационный материал. *Управление техносферой*. 2020;3(4):447–461. <https://doi.org/10.34828/UdSU.2020.35.32.004>  
Guman O.M., Makarov A.B., Wegner-Kozlova E.O. Technogenic formations as a recultivation material. *Upravlenie Tekhnosferoi*. 2020;3(4):447–461 (In Russ.) <https://doi.org/10.34828/UdSU.2020.35.32.004>
13. Zhai Q., Liu R., Wang C. et al. A potential industrial waste–waste synchronous treatment scheme of utilizing copper slag flotation tailings to remediate Cr (VI)-containing wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(3):107685. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107685>
14. Золотова Е.С., Рябинин В.Ф., Котельникова А.Л., Иванова Н.С. Оценка мобильности элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в лесные почвы. *Литосфера*. 2020;20(5):717–726. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726>  
Zolotova E.S., Ryabinin V.F., Kotelnikova A.L., Ivanova N.S. Assessment of element mobility from copper smelting waste slag into forest soils. *Lithosphere (Russia)*. 2020;20(5):717–726. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726>
15. Zolotova E., Kotelnikova A., Ryabinin V. The content of toxic elements in soil-plant system based on ombrotrophic peat with the copper smelting slag recycling waste. *Pollution*. 2023;9(1):286–298. <https://doi.org/10.22059/poll.2022.346474.1551>
16. Kart E.U. Evaluation of sulphation baking and autogenous leaching behaviour of Turkish metallurgical slag flotation tailings. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2021;57(4):107–116. <https://doi.org/10.37190/ppmp/138839>
17. Gümüşsoy A., Başıyigit M., Kart E.U. Economic potential and environmental impact of metal recovery from copper slag flotation tailings. *Resources Policy*. 2023;80:103232. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103232>
18. Светлов А.В. Разработка методов обогащения для сложных объектов цветной металлургии Мурманской области. *Минералогия техногенеза*. 2018;(19):205–216.  
Svetlov A.V. Development of enrichment methods for low-grade non-ferrous metallurgy objects in the Murmansk region. *Mineralogy of Technogenesis*. 2018;(19):205–216. (In Russ.)
19. Tian H., Guo Z., Pan J. et al. Comprehensive review on metallurgical recycling and cleaning of copper slag. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;168:105366. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105366>
20. Araujo F.S., Taborda-Llano I., Nunes E.B., Santos R.M. Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. *Geosciences*. 2022;12(9):319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
21. Макаров А.Б., Гуман О.М., Долинина И.А. Минеральный состав отходов переработки отвальных шлаков Среднеуральского медеплавильного завода и оценка их потенциальной экологической опасности. *Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества*. 2010;(7):80–86.  
Makarov A.B., Guman O.M., Dolinina I.A. Mineral composition of waste slag processing from the Sredneuralsk copper smelter and assessment of their potential environmental hazard. *Bulletin of the Ural Branch of the Russian Mineralogical Society*. 2010;(7):80–86. (In Russ.)
22. Грудинский П.И., Дюбанов В.Г. Исследование процесса сульфатизирующего обжига цинксодержащих хвостов производства меди с использованием сульфатов железа. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018;(12–1):83–87. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.014>  
Grudinsky P.I., Dyubanov V.G. Research of the process of sulphating roasting of zinc-containing tailings in copper production using iron sulfates. *International Research Journal*. 2018;(12–1):83–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.014>
23. Котельникова А.Л., Рябинин В.Ф. Особенности вещественного состава и перспективы использования отхода вторичной переработки отвальных медеплавильных шлаков. *Литосфера*. 2018;18(1):133–139. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139>  
Kotelnikova A.L., Ryabinin V.F. The composition features and perspective of use for the copper slag recycling waste. *Lithosphere (Russia)*. 2018;18(1):133–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139>
24. Реутов Д.С., Халезов Б.Д. Поиск оптимальных условий сернокислотного выщелачивания для извлечения меди и цинка из хвостов флотации медеплавильных шлаков. *Бутлеровские сообщения*. 2015;44(12):199–203.  
Reutov D.S., Khalezov B.D. The search for optimal conditions for sulfuric acid leaching to recover copper and zinc from flotation tailings copper slag. *Butlerov Communications*. 2015;44(12):199–203. (In Russ.)
25. *Современные технологии переработки техногенного сырья*. Под общей ред. Булатова К. В., Газалеевой Г. И. Монография. Екатеринбург: АО «ИПП «Уральский Рабочий»; 2019. 200 с.  
Bulatova K.V., Gazaleeva G.I. (sci. ed.) *Modern technologies for processing technogenic raw materials*. Monograph. Yekaterinburg: JSC “IPP “Ural Worker”; 2019. 200 p. (In Russ.)
26. Li S., Guo Z., Pan J. et al. Stepwise utilization process to recover valuable components from copper slag. *Minerals*. 2021;11(2):211. <https://doi.org/10.3390/min11020211>



27. Филатов В.В., Иванченко В.С., Глухих И.И. *Петромагнетизм в рудной геофизике*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ; 2011. 414 с.  
Filatov V.V., Ivanchenko V.S., Glukhikh I.I. *Petromagnetism in ore geophysics*. Ekaterinburg: UGGU; 2011. 414 p. (In Russ.)
28. Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В. и др. Обоснование интегративного критерия для прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2023;21(3):15–26. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26>  
Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V. et al. Providing a rationale for an integrative criterion to predict the potential selective disintegration of technology-related, complex structured raw materials. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2023;21(3):15–26. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26>
29. Санакулов К.С., Хасанов А.С. *Переработка шлаков медного производства*. Ташкент: Фан; 2007. 206 с.  
Sanakulov K.S., Khasanov A.S. *Processing of slag in copper production*. Tashkent: Fan Publ. House; 2007. 206 p. (In Russ.)
30. Ерохин Ю.В., Козлов П.С. Фаялит из шлаков Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда). *Минералогия техногенеза*. 2010;(11):32–40.  
Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. Fayalite from slags of the Sredneursk copper smeltery (Revda city). *Mineralogy of Technogenesis*. 2010;(11):32–40. (In Russ.)
31. Belley F., Ferré E.C., Martín-Hernández F. et al. The magnetic properties of natural and synthetic (Fe<sub>x</sub>, Mg<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> olivines. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;284(3–4):516–526. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.05.016>
32. Geiger C.A., Vielreicher N.M., Dachs E. Are the thermodynamic properties of natural and synthetic Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>–Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> olivines the same? *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*. 2021;106(2):317–321. <https://doi.org/10.2138/am-2021-7764CCBY>
33. Ерохин Ю.В., Козлов П.С. Магнетитовый шлак из Среднеуральского медеплавильного завода. *Минералогия техногенеза*. 2013;(14):29–37.  
Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. Magnetite slags from the Sredneursk copper smeltery. *Mineralogy of Technogenesis*. 2013;(14):29–37. (In Russ.)
34. Ziese M., Esquinazi P.D., Pantel D. et al. Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): a new variant of relaxor multiferroic. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2012;24(8):086007–086015. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/24/8/086007>
35. Пелевин А.Е. Магнитная восприимчивость слабомагнитных породных минералов. В: *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIV Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XVII Уральской горнопромышленной декады*. Екатеринбург, 09–12 апреля 2019 года. Екатеринбург: Издательство «Форт Диалог-Исеть»; 2019. С. 314–316.  
Pelevin A.E. Magnetic susceptibility of weakly magnetic rock minerals. In: *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: materials of the XXIV International Scientific and Technical Conference held as part of the XVII Ural Mining Decade*. Yekaterinburg, April 09–12, 2019. Ekaterinburg: Publ. House “Fort Dialog-Iset”; 2019. Pp. 314–316. (In Russ.)
36. Писакин Б.Н. Идентификационные признаки пирротина как катиондефицитного магнитного минерала. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2004;1(7):3–12.  
Pisakin B.N. Identification features of pyrrhotite as a cation-deficient magnetic mineral. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2004;1(7):3–12. (In Russ.)
37. Кармазин В.И., Кармазин В.В. *Магнитные методы обогащения*. М.: Недра; 1984. 416 с.  
Karmazin V.I., Karmazin V.V. *Magnetic methods of enrichment*. Moscow: Nedra Publ. House; 1984. 416 p. (In Russ.)
38. Гзогян Т.Н., Головин Ю.И., Тюрин А.И., Гзогян С.Р. Влияние границ сростания минералов железистых кварцитов на рудоподготовку. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(3):154–162.  
Gzogyan T.N., Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Gzogyan S.R. Effect of intergrowth boundaries between mineral species of ferruginous quartzite on ore pretreatment. *Journal of Mining Sciences*. 2017;(3):154–162. (In Russ.)
39. Юсупов Т.С., Уракаев Ф.Х., Исупов В.П. Прогноз структурно-химических изменений минералов при механических воздействиях в процессе измельчения. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015;(5):161–168.  
Yusupov T.S., Urakaev F.Kh., Isupov V.P. Prediction of structural-chemical change in minerals under mechanical impact during grinding. *Journal of Mining Sciences*. 2015;(5):161–168. (In Russ.)
40. Гзогян Т.Н. К вопросу генетической дефектности магнетита Михайловского месторождения КМА. *Обогащение руд*. 2002;(3):29–33.  
Gzogyan T.N. On the issue of genetic defectiveness of magnetite from the Mikhailovskoye KMA deposit. *Obogashchenie Rud*. 2002;(3):29–33. (In Russ.)



41. Харлов А.В. Установки для электроразрядных технологий и их технические применения (обзор). *Приборы и техника эксперимента*. 2022;(1):14–43. <https://doi.org/10.31857/S0032816221060173>  
Kharlov A.V. Generators for electric-discharge technologies and their technical applications (review). *Instruments and Experimental Techniques*. 2022;65(1):1–28. <https://doi.org/10.1134/S0020441221060154>
42. Прокопьев С.А., Прокопьев Е.С., Емельянова К.К., Напольских С.А. Получение высококачественного магнетит-гематитового железорудного концентрата методом винтовой сепарации. *Горный журнал*. 2021;(6):86–90. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.06.07>  
Prokopyev S.A., Prokopyev E.S., Emelyanova K.K., Napolskikh S.A. High-quality magnetite–hematite concentrate production by spiral separation. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(6):86–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.06.07>

### Информация об авторах

**Алла Леонидовна Котельникова** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и рудообразующих процессов, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4968-1938](https://orcid.org/0000-0003-4968-1938); e-mail [kotelnikova@prm.uran.ru](mailto:kotelnikova@prm.uran.ru)

**Екатерина Сергеевна Золотова** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и рудообразующих процессов, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5892-9205](https://orcid.org/0000-0002-5892-9205); e-mail [zolotova@igg.uran.ru](mailto:zolotova@igg.uran.ru)

### Information about the authors

**Alla L. Kotelnikova** – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Forming Processes, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4968-1938](https://orcid.org/0000-0003-4968-1938); e-mail [kotelnikova@prm.uran.ru](mailto:kotelnikova@prm.uran.ru)

**Ekaterina S. Zolotova** – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Forming Processes, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5892-9205](https://orcid.org/0000-0002-5892-9205); e-mail [zolotova@igg.uran.ru](mailto:zolotova@igg.uran.ru)

**Поступила в редакцию** 12.08.2023  
**Поступила после рецензирования** 13.06.2024  
**Принята к публикации** 13.08.2024

**Received** 12.08.2023  
**Revised** 13.06.2024  
**Accepted** 13.08.2024