

Научная статья
УДК 622.7
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.047

КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУЧЕНИЕМ СУЛЬФАТА ЖЕЛЕЗА

Андрей Александрович Горячев¹, Валерия Николаевна Дубровина², Юлия Валерьевна Невзорова³, Дмитрий Викторович Макаров⁴, Алена Аркадьевна Компанченко⁵

¹Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики Центра наноматериаловедения Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

^{1–4}Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

⁵Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹a.goryachev@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

²samarina_lera@list.ru, <http://orcid.org/0009-0003-8107-203X>

³y.nevzorova@ksc.ru, <http://orcid.org/0009-0000-4756-6026>

⁴d.makarov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

⁵a.kompanchenko@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1240-7898>

Аннотация

Рассмотрена возможность переработки лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд с извлечением цветных металлов и получением кристаллогидратов сульфата железа. Для извлечения цветных металлов предложен метод кучного биовыщелачивания предварительно гранулированных хвостов. В качестве связующих компонентов при грануляции были выбраны 30 %-й раствор серной кислоты, бактериальный раствор *Acidithiobacillus ferrooxidans* и поливинилацетатный клей (ПВА). Результаты показали обратную зависимость между прочностью гранул и уровнем извлечения металлов. Максимальные концентрации металлов на стадии кучного биовыщелачивания отмечены для гранул, приготовленных с использованием серной кислоты. Для получения кристаллогидратов сульфата железа проводили сернокислотное выщелачивание хвостов обогащения (неизмельченных и измельченных до класса -71 мкм) в статическом режиме при температуре ~22 °С. Выбранный режим позволил получить кристаллогидраты сульфата двухвалентного железа — роценит и мелантерит.

Ключевые слова:

хвосты обогащения, медно-никелевое сырье, биовыщелачивание, цветные металлы, сульфат железа

Благодарности:

работа выполнена в рамках тем НИР №№ FMEZ-2025-0044 и FMEZ-2025-0046 и при поддержке гранта в форме субсидий из областного бюджета некоммерческим организациям, не являющимся казенными учреждениями, на поддержку научно-исследовательских проектов молодых ученых Мурманской области в 2025 г. (соглашение № 35 от 31.01.2025. Проект «Обоснование применения адаптированной под климатические условия Арктической зоны РФ технологии переработки лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд»).

Финансирование:

государственное задание по темам НИР №№ FMEZ-2025-0044 и FMEZ-2025-0046.

Для цитирования:

Комплексная переработка лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд с извлечением цветных металлов и получением сульфата железа / А. А. Горячев [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 276–281. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.047.

Original article

INTERGRATED PROCESSING OF STALE COPPER-NICKEL ORE DRESSING TAILINGS WITH THE EXTRACTION OF NON-FERROUS METALS AND PRODUCTION OF FERROUS SULFATE

Andrey A. Goryachev¹, Valeria N. Dubrovina², Yulia V. Nevzorova³, Dmitriy V. Makarov⁴, Alena A. Kompanchenko⁵

¹Laboratory of Nature-Based Technologies & Technosphere Safety in the Arctic of Nanomaterials Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

^{1–4}Institute of Industrial Ecology Problems—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

⁵Geological Institute—Subdivision of the Federal Research Centre

“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

¹a.goryachev@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

²samarina_lera@list.ru, <http://orcid.org/0009-0003-8107-203X>

³y.nevzorova@ksc.ru, <http://orcid.org/0009-0000-4756-6026>

⁴d.makarov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

⁵a.kompanchenko@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1240-7898>

Abstract

This study investigates the feasibility of processing stale copper-nickel ore dressing tailings to recover non-ferrous metals and produce iron sulfate crystal hydrates. A method of heap bioleaching of pre-granulated tailings was proposed for the recovery of non-ferrous metals. The binding agents used for granulation were a 30 % sulfuric acid solution, a bacterial solution of *Acidithiobacillus ferrooxidans*, and polyvinyl acetate (PVA) glue. The results showed an inverse relationship between pellet strength and metal recovery efficiency. The highest metal concentrations during the heap bioleaching stage were observed in pellets prepared using sulfuric acid. To obtain iron sulfate crystal hydrates, sulfuric acid leaching of the ore dressing tailings (both as-received and ground to $-71\ \mu\text{m}$) was conducted under static conditions at a temperature of $\sim 22\ ^\circ\text{C}$. This selected regime yielded crystal hydrates of ferrous sulfate—rozenite and melanterite.

Keywords:

tailings, copper-nickel raw materials, bioleaching, non-ferrous metals, ferrous sulfate

Acknowledgments:

The work was carried out as part of the research topics No. FMEZ-2025-0044 and FMEZ-2025-0046 and with the support of a grant in the form of subsidies from the regional budget to non-profit organizations that are not state institutions, to support research projects of young scientists of the Murmansk region in 2025 under agreement No. 35 of 31.01.25, the project “Justification for the Application of a Technology for Processing Aged Copper-Nickel Ore Tailings Adapted to the Climatic Conditions of the Arctic Zone of the Russian Federation”.

Funding:

State assignment for research topics No. FMEZ-2025-0044 and FMEZ-2025-0046.

For citation:

Integrated processing of stale copper-nickel ore dressing tailings with the extraction of non-ferrous metals and production of ferrous sulfate / A. A. Goryachev [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 276–281. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.047.

Введение

Низкосортные руды и концентраты, отвалы вскрышных пород, хвосты обогатительных фабрик и шлаки цветной металлургии представляют собой перспективные источники цветных металлов. Повышенное внимание уделяется хвостам обогащения медно-никелевых руд, так как потери цветных металлов в обогатительном цикле зачастую превышают 30 % [1] (например, извлечение металлов из руды на АО «Кольская ГМК» не превышает 70 %). Переработка такого сырья традиционными методами чаще всего является экономически нецелесообразной, что обуславливает необходимость поиска альтернативных способов извлечения цветных металлов из подобного некондиционного техногенного сырья [2]. При этом переработка хвостов должна сопровождаться максимально полным извлечением полезных компонентов.

Материалы и методы

Перспективным для переработки объектом представляется хранилище отходов обогащения медно-никелевых руд, расположенное около п. Африканда. Хвостохранилище сформировано в процессе деятельности опытной обогатительной фабрики [3]. Для данного объекта рассмотрены два возможных направления переработки: извлечение цветных металлов методом кучного биовыщелачивания и получение кристаллов сульфата железа методом реакторного сернокислотного выщелачивания. Исследования по извлечению цветных металлов проводили с использованием медно-никелевых хвостов двух классов крупности: исходного (преобладающий класс крупности $-250 + 100\ \mu\text{m}$) и измельченного до класса $-71\ \mu\text{m}$. Хвосты перед выщелачиванием были гранулированы, в качестве связующих компонентов применялись 30 %-й раствор серной кислоты, бактериальный раствор *Acidithiobacillus ferrooxidans* и поливинилацетатный клей (ПВА) в различном сочетании. Минеральный состав хвостов определялся с помощью оптической микроскопии. Изучение проводилось в отраженном поляризованном свете на поляризационном микроскопе AxioPlan II с блоком видеорегистрации. Для этого был изготовлен искусственный аншлиф на основе эпоксидной смолы.

Гранулирование хвостов осуществляли на лабораторном грануляторе ФЛ015-1К-02 (ООО «Дзержинсктехномаш», Россия), в результате чего получались гранулы в форме таблеток диаметром 3–4 мм и толщиной 1–1,5 мм. Для оценки поведения гранул в условиях, имитирующих кучное биовыщелачивание, были собраны четыре пластиковые колонки, в которые помещали полученные гранулы. Масса навески составила 200 г. Технологический цикл включал стадию влагонасыщения (двукратную подачу 100 мл дистиллированной воды на вершину каждой колонки) с последующим пятидневным биовыщелачиванием с ежедневной подачей 50 мл бактериального раствора рециркуляционным способом. Исследования по моделированию кучного выщелачивания проводились при температуре окружающей среды $+19 \pm 1$ °С. Для получения кристаллогидратов сульфата железа проводили выщелачивание хвостов обогащения (неизмельченных и измельченных до класса -71 мкм) в статическом режиме. В качестве реагента был использован 30 %-й раствор серной кислоты, продолжительность опыта составила 3 ч, соотношение Т:Ж 1:3. Суспензию перемешивали с интенсивностью 400 мин⁻¹. Полученные растворы отфильтровывали через фильтр «Синяя лента» с использованием вакуумного насоса и хранили при температуре +5 °С в течение 24 ч. Затем кристаллы отделяли также с помощью фильтра «Синяя лента» на вакуумном насосе, выдерживали в течение 24 ч на открытом воздухе при температуре ~22 °С и исследовали фазовый состав.

Результаты

Минеральный состав хвостов в основной массе представлен породообразующими силикатными минералами (оливином, серпентином, пироксенами, хлоритами и др.) (рис. 1). Основные рудные минералы представлены сульфидами, магнетитом, хромитом и ильменитом. Сульфиды отмечаются в виде тонкой эмульсионной вкрапленности в оливине и замещающем его серпентине, а также совместных сростков с другими рудными и породообразующими минералами или отдельных зерен. Установлено, что пирротин (Fe_{1-x}S) — наиболее распространенный сульфид хвостов, представлен преимущественно в виде сростков с силикатами, реже — с магнетитом (Fe_3O_4), халькопиритом (CuFeS_2) или раскрытыми зернами. Пирротин содержит в себе пламенивидные вросстки пентландита ($(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$). В составе пирротина отмечена небольшая примесь никеля (до 1 %). Пентландит также встречается в виде отдельных раскрытых зерен или сростков с магнетитом или халькопиритом. Вторичные минералы по рудным представлены гетитом по магнетиту, ковеллином по халькопириту, миллеритом и виоларитом по пентландиту.

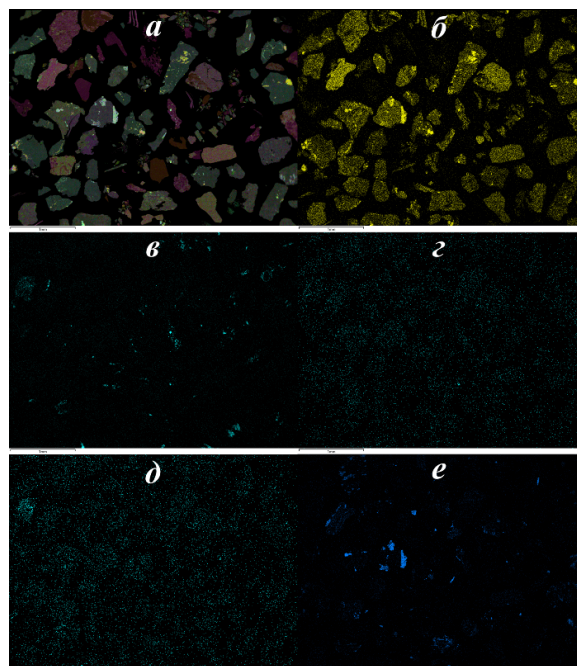


Рис. 1. Многослойное СЭМ-изображение (а) и карты распределения железа (б), серы (в), меди (г), никеля (д), титана (е)

Проведенные исследования подтвердили эффективность технологии кучного биовыщелачивания с предварительным гранулированием для извлечения цветных металлов из лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд. Гранулирование с использованием комбинации серной кислоты и ПВА позволило получать прочные гранулы (до 7,23 МПа), однако введение ПВА несколько снижало извлечение металлов в раствор. Применение только серной кислоты обеспечивало максимальные концентрации в растворе (Ni — 19,9 мг/л, Cu — 7,43 мг/л, Co — 0,98 мг/л), но снижало прочность гранул. Ключевым фактором эффективности является измельчение хвостов до класса -71 мкм, что повышает как прочность гранул, так и доступность металлов для выщелачивания.

Для извлечения меди из продуктивного раствора могут быть использованы методы цементации и гальванокоагуляции. Цементация особенно эффективна для небольших производственных объемов (до 5 тысяч тонн в год) и при низкой концентрации ионов меди в растворе (менее 200 мг/л), когда использование экстракционных методов очистки растворов становится экономически невыгодным. Процесс извлечения меди путем цементации был тщательно изучен Б. Д. Халезовым, который разработал оптимальные режимы и аппаратные решения для этой технологии [4]. В практической реализации цементации часто используют железный лом, обезжиренную консервную жесть, жестяную обрезь, а также губчатое железо.

После извлечения меди из раствора, как правило, остается значительное количество железа, которое необходимо удалить перед дальнейшей обработкой раствора для извлечения никеля. Одним из эффективных способов осаждения железа является барботирование кислородом, что позволяет перевести железо в трехвалентную форму, после чего добавлением негашеной извести или других подщелачивающих агентов можно вызвать осаждение железа в виде железо-гипсового кека. Этот кек может быть использован в производстве строительных материалов, что способствует минимизации отходов и добавленной стоимости процесса. Для получения товарного никелевого продукта, такого как гидроксид никеля, в раствор добавляют негашеную известь или брусит, что приводит к осаждению гидроксида никеля при $\text{pH} = 6,7$. Получение гидроксида никеля является важным этапом в переработке растворов, поскольку позволяет получить продукт, пригодный для дальнейшего использования в промышленности.

Проведенные исследования сернокислотного реакторного выщелачивания медно-никелевых хвостов выявили принципиальное различие в составе кристаллических продуктов в зависимости от степени измельчения исходного материала. Для неизмельченных хвостов (класс крупности -250 + 100 мкм) характерно преимущественное образование кристаллогидратов сульфата железа ($\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ — мелантерит, $\text{FeSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$ — роценит) (рис. 2, а), тогда как при переработке измельченного материала (класс -71 мкм) доминирует кристаллизация сульфатов магния ($\text{MgSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$ — старкеит, $\text{MgSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$ — пентагидрит) (рис. 2, б). Эта особенность может быть объяснена с позиции минералогических характеристик сырья. В неизмельченных хвостах железо преимущественно ассоциировано с относительно легко выщелачиваемыми фазами (сульфиды, оксиды, гидроксиды), расположенными на поверхности частиц или в трещиноватых зонах. Кислотное выщелачивание таких форм происходит быстро и селективно. Магний в исходном материале, вероятно, включен в структуру более устойчивых силикатных минералов (оливинов, пироксенов), требующих механического разрушения кристаллической решетки для перехода в раствор. Уменьшение размера частиц до -71 мкм приводит к увеличению удельной поверхности, обнажению ранее недоступных минеральных фаз, интенсификации диффузионных процессов. Для силикатов, содержащих магний, это критически важно — их растворение требует не только кислотного воздействия, но и разрушения Si–O связей, что становится возможным только при достаточной степени дисперсности.

Кристаллы сульфата железа, получаемые из лежалых хвостов обогащения, представляют значительный интерес для различных отраслей промышленности. Наиболее широкое применение

сульфат железа, главным образом семиводный ($\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$), находит в производстве минеральных удобрений, где он используется как источник микроэлемента железа в хелатной форме, особенно эффективной для растений на карбонатных почвах [5; 6]. В водоочистных сооружениях кристаллы сульфата железа служат эффективным коагулянтом для удаления фосфатов, тяжелых металлов и взвешенных веществ, превосходя по некоторым параметрам традиционные алюминиевые коагулянты. В химической промышленности моногидрат сульфата железа ($\text{FeSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$) находит применение в производстве железистых пигментов, где он служит исходным сырьем для синтеза красного (Fe_2O_3), желтого (FeOOH) и черного (Fe_3O_4) пигментов через контролируемые процессы термического разложения и окисления. Перспективным направлением является использование сульфата в технологиях очистки газовых выбросов, в частности для удаления сероводорода методом железо-аммиачной промывки, где эффективность очистки достигает 99,5 % [7; 8]. Однако широкому применению кристаллов сульфата железа препятствует ряд технологических проблем. Основной проблемой является их склонность к окислению и гидролизу при хранении, что приводит к образованию нерастворимых основных солей и потере товарных качеств. Решение этой проблемы видится в разработке специальных стабилизирующих добавок на основе органических кислот (аскорбиновой, лимонной) или в применении защитных покрытий из парафинов и полимеров.

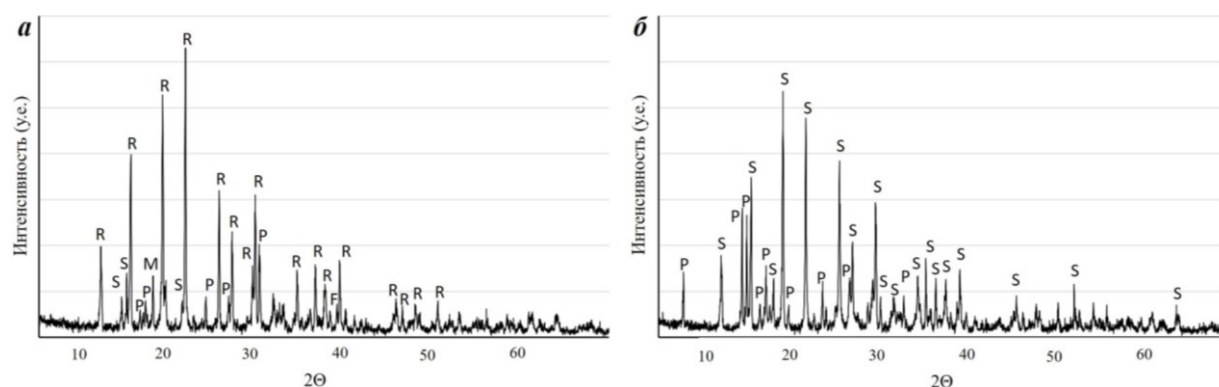


Рис. 2. Дифрактограммы кристаллов сульфата железа, полученных из неизмельченных (а) и измельченных (б) до класса -71 мкм хвостов. Рефлексы: R — роценит $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$; M — мелантерит $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$; S — старкеит $\text{MgSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$; P — пентагидрит $\text{MgSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$; F — феррогексагидрит $\text{FeSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$

Выводы

Проведенные исследования подтвердили перспективность комплексной переработки лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд с применением комбинированных методов серноокислотного реакторного выщелачивания и кучного биовыщелачивания. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию параметров процессов, повышение стабильности получаемых продуктов и разработку методов их практического применения в различных отраслях промышленности.

Список источников

1. Черноусенко Е. В., Каменева Ю. С., Вишнякова И. Н., Митрофанова Г. В. Повышение эффективности флотационного обогащения труднообогатимых сульфидных медно-никелевых руд Печенгского рудного поля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 6. С. 173–179.
2. Макаров Д. В., Мазухина С. И., Нестерова А. А., Нестеров Д. П., Маслобоев В. А. Экспериментальное исследование и термодинамическое моделирование гипергенных процессов в хвостах обогащения медно-никелевых руд // Минералогия техногенеза. 2007. Т. 8. С. 146–164.
3. Горячев А. А. Обоснование и разработка термогидрохимической технологии переработки медно-никелевых руд и техногенных продуктов с использованием сульфата аммония: дис. ... канд. тех. наук. М., 2024. 140 с.
4. Халезов Б. Д., Ватолин Н. А., Макурин Ю. Н., Быков Н. А. Исследование извлечения меди в барабанном цементаторе // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2005. № 5. С. 302–311.
5. Битук А. Д., Воронцов Р. А. Исследование процесса комплексной переработки железного купороса на технические продукты // Молодежь и научно-технический прогресс. 2019. С. 285–286.

6. Гейгер Е. Ю., Варламова Л. Д., Семенов В. В., Погодина Ю. В., Сиротина Ю. А. Микроудобрения на хелатной основе: опыт и перспективы использования // *Агрохимический вестник*. 2017. № 2. С. 29–32.
7. Ещенко Л. С., Мечай А. А., Новик Д. М., Бородин К. В. Получение пигментного материала в системе $\text{FeSO}_4\text{-CaO-H}_2\text{O}$ для окрашивания силикатного кирпича // *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2018. Т. 211, № 2. С. 113–117.
8. Шаматов С. А., Рахманов И. У. Получение сульфата натрия и железистого пигмента на основе железного купороса // *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*. 2021. Т. 1, № 4. С. 1478–1482.

References

1. Chernousenko E. V., Kameneva Yu. S., Vishnyakova I. N., Mitrofanova G. V. Povysheniye effektivnosti flotatsionnogo obogashcheniya trudnoobogatimyykh sul'fidnykh medno-nikelevykh rud Pechengskogo rudnogo polya [Increasing Efficiency of Pechenga Rebellious Copper-Nickel Sulphide Ore Flotation]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Journal of Mining Science], 2018, No. 6, pp. 173–179. (In Russ.).
2. Makarov D. V., Mazukhina S. I., Nesterova A. A., Nesterov D. P., Masloboev V. A. Eksperimental'noye issledovaniye i termodinamicheskoye modelirovaniye gipergennykh protsessov v khvostakh obogashcheniya medno-nikelevykh rud [Experimental study and thermodynamic modeling of supergene processes in tailings of copper-nickel ores]. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis], 2007, Vol. 8, pp. 146–164. (In Russ.).
3. Goryachev A. A. Obosnovaniye i razrabotka termogidrokhimicheskoy tekhnologii pererabotki medno-nikelevykh rud i tekhnogennykh produktov s ispol'zovaniyem sul'fata ammoniya: dis. ... kand. tekhn. nauk [Substantiation and development of a thermohydrochemical technology for processing copper-nickel ores and technogenic products using ammonium sulfate. PhD (Engineering) thesis]. Moscow, 2024, 140 p. (In Russ.).
4. Khalezov B. D., Vatolin N. A., Makurin Yu. N., Bykov N. A. Issledovaniye izvlecheniya medi v barabannom tsementatore [Study of copper extraction in a drum cementator]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2005, No. 5, pp. 302–311. (In Russ.).
5. Bituk A. D., Vorontsov R. A. Issledovaniye protsessa kompleksnoy pererabotki zheleznogo kuporosa na tekhnicheskiye produkty [Study of the process of complex processing of ferrous sulfate into technical products]. *Molodezh' i nauchno-tekhnicheskiy progress* [Youth and Scientific and Technical Progress], 2019, pp. 285–286. (In Russ.).
6. Geiger E. Yu., Varlamova L. D., Semenov V. V., Pogodina Yu. V., Sirotnina Yu. A. Mikroudobreniya na khelatnoy osnove: opyt i perspektivy ispol'zovaniya [Chelated microfertilizers: experience and prospects of use]. *Agrokhimicheskii Vestnik* [Agrochemical Bulletin], 2017, No. 2, pp. 29–32. (In Russ.).
7. Yeshchenko L. S., Mechay A. A., Novik D. M., Borodina K. V. Polucheniye pigmentnogo materiala v sisteme $\text{FeSO}_4\text{-CaO-H}_2\text{O}$ dlya okrashivaniya silikatnogo kirpicha [Obtaining of pigment material in the system $\text{FeSO}_4\text{-CaO-H}_2\text{O}$ for coloring of silicate bricks]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Tekhnicheskiye tekhnologii, biotekhnologiya, Khimicheskaya geoekologiya* [Proceedings of BSTU: Series 2. Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology], 2018, Vol. 211, No. 2, pp. 113–117. (In Russ.).
8. Shamratov S. A., Rakhmanov I. U. Polucheniye sul'fata natriya i zhelezooksidnogo pigmenta na osnove zheleznogo kuporosa [Production of sodium sulfate and iron oxide pigment based on ferrous sulfate]. *Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences*, 2021, Vol. 1, No. 4, pp. 1478–1482. (In Russ.).

Информация об авторах

А. А. Горячев — кандидат технических наук, младший научный сотрудник;

В. Н. Дубровина — магистрант, инженер;

Ю. В. Невзорова — аспирант, инженер;

Д. В. Макаров — доктор технических наук, директор;

А. А. Компанченко — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

A. A. Goryachev — PhD (Engineering), Research Assistant;

V. N. Dubrovina — M.Sc., Engineer

Yu. V. Nevzorova — Postgraduate Student, Engineer;

D. V. Makarov — DSc (Engineering), Director;

A. A. Kompanchenko — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 01.09.2025; одобрена после рецензирования 22.09.2025; принята к публикации 30.09.2025.
The article was submitted 01.09.2025; approved after reviewing 22.09.2025; accepted for publication 30.09.2025.