

Алгоритм выщелачивания металлов из некондиционного сырья

Владимир Иванович ГОЛИК^{1*}

Нияз Гадым оглы ВАЛИЕВ^{2**}

Владимир Сергеевич БРИГИДА^{3***}

Станислав Александрович МАСЛЕННИКОВ^{4****}

Максим Сергеевич ЛЕБЗИН^{2*****}

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

³Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Сочи, Россия

⁴Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты Ростовской области, Россия

Аннотация

Целью работы является детализация концепции повышения эффективности производства металлов путем выщелачивания некондиционных руд и хвостов первичной переработки. Алгоритм управления процессами выщелачивания некондиционных по содержанию металлов цветных руд в целом сформулирован, но на пути освоения этой технологии в промышленных масштабах остается много нерешенных проблем. В хвостах обогащения оказывается много неизвлеченных металлов, что имеет негативные последствия.

Методология исследований предусматривает анализ теории и практики извлечения металлов в производственный раствор. Методологической основой феномена активации процесса выщелачивания является изменение свойств металлосодержащего сырья посредством воздействия на него. Результаты аналитических и лабораторных исследований формируют базу для выработки рекомендаций.

Результаты. Уточнен механизм феномена реагентного перевода металла в растворимые соединения. Определена количественно зависимость пропускной способности горной массы от соотношения диаметра пор с диаметром взвесей, а также крупность рудных кусков и степень их ассоциации с железосодержащими минералами. Приведены особенности подземного блокового выщелачивания руд различных металлов и методов корректировки процесса. Определены количественные параметры условий для обеспечения пленочно-капельного движения выщелачивающего раствора реагентов. Разработан алгоритм выбора элементов управления параметрами выщелачивания. Сопоставлены параметры показателей выщелачивания для альтернативных технологий.

Выводы. Доказано, что разработка алгоритма управления процессом выщелачивания металлов из некондиционного по содержанию сырья способствует возвращению в сферу производства ценного и дефицитного минерального сырья.

Ключевые слова: металл, выщелачивание, руда, хвосты обогащения, извлечение, воздействие, блоки, алгоритм, технологии.

Введение

В условиях дефицита металлов для удовлетворения запросов промышленности актуализируется задача повышения эффективности производства их путем переработки некондиционных руд, в том числе выщелачиванием [1, 2].

С середины XX в. сформирован банк данных и разработан алгоритм управления процессами выщелачивания некондиционных по содержанию металлов цветных руд, но на пути освоения этой технологии в промышленных масштабах остается много нерешенных проблем [3–5].

Причиной ослабления минерально-сырьевой базы металлургических заводов Урала, Кольского полуострова, Приморья и других регионов России являются низкие

показатели извлечения металлов из руд, которые варьируются в диапазоне 10–80 %. В хвостах обогащения оказывается много неизвлеченных металлов, поэтому отходы переработки руд по содержанию металлов нередко сопоставимы с содержанием в бедных рудах.

Получение металлов из некондиционных по содержанию металлов руд выщелачиванием стало основной технологией при эксплуатации уже 13 месторождений России.

Крупными техногенными месторождениями являются хвосты обогащения, шлаки металлургических заводов и некондиционные руды. Расчеты показывают, что потен-

✉ v.i.golik@mail.ru

**gtf.gd@m.ursmu.ru

***1z011@inbox.ru

****mail@sssu.ru

*****az_ma@mail.ru

циальная ценность неизвлеченных металлов в отходах переработки сопоставима с ценностью извлеченных металлов или превосходит ее.

Проблема освоения техногенных месторождений является приоритетной в направлении рационального использования ресурсов недр [6, 7].

Вопросам извлечения металлов при утилизации твердых и жидких отходов горно-обогатительного передела посвящены работы ряда авторов [8, 9].

Параметры технологических процессов выщелачивания металлов исследуются и оптимизируются специалистами России и зарубежья [10–12].

Рассматриваемая проблема получает приоритетные позиции в программах радикальной прорывной модернизации горного производства, в том числе с использованием искусственного интеллекта в процедурах аудита [13–15].

Целью настоящего исследования является детализация научных основ управления процессами выщелачивания металлов из некондиционных руд и хвостов их обогащения.

Методика

Перспективность модернизации управления процессами выщелачивания металлов из некондиционных руд и хвостов их обогащения обосновывается результатами исследования механизма и параметров процессов извлечения металлов в производственный раствор. Для этого показатели традиционных и новых технологий выщелачивания металлов из убогих руд и хвостов обогащения руд анализируются и служат основой для принятия решений.

Методологической основой феномена активации процесса выщелачивания является изменение свойств металлосодержащего сырья посредством механохимического воздействия на него.

Целью модернизации является создание благоприятных условий для пленочно-капельного движения раствора выщелачивающих реагентов. Результаты аналитических и лабораторных исследований создают базу для выработки рекомендаций по существу рассматриваемой проблемы. Взаимозависимость параметров феномена выщелачивания металлов из минерального сырья интерпретируется графически.

Результаты

Выщелачивание использует давно известный феномен перевода металла в растворимые соединения при движении выщелачивающего раствора сквозь измельченную руду. Количество проникающего сквозь руду раствора и удельная поверхность частиц взаимозависимы, а сопротивление их фильтрации зависит от удельной поверхности частиц, площади эффективного сечения пор и соотношения пустот между частицами, которое, в свою очередь, определяется наличием рудной мелочи и продуктов взаимодействия рудных минералов с породами (рис. 1).

Заполнение пор снижает скорость проникновения растворов:

$$W = A(N_n - nq),$$

где W – скорость фильтрации на 1 м^2 поверхности материала; N – количество пор; q – объем фильтрата; n – количество твердых частиц в единице объема суспензии.

При выщелачивании сульфидсодержащего сырья определяющую роль играют крупность рудных кусков и степень их ассоциации с пиритом и арсенипиритом.

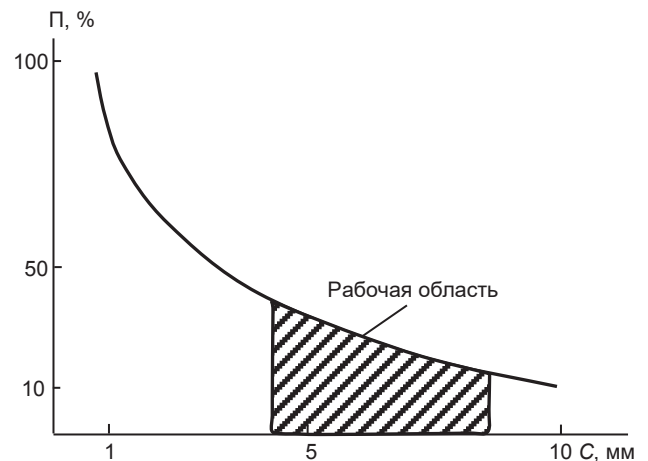


Рисунок 1. Зависимость пропускной способности горной массы Π от соотношения диаметра пор с диаметром взвесей C
Figure 1. Dependence of the throughput capacity of rock mass Π on the ratio of pore diameter to suspension diameter C

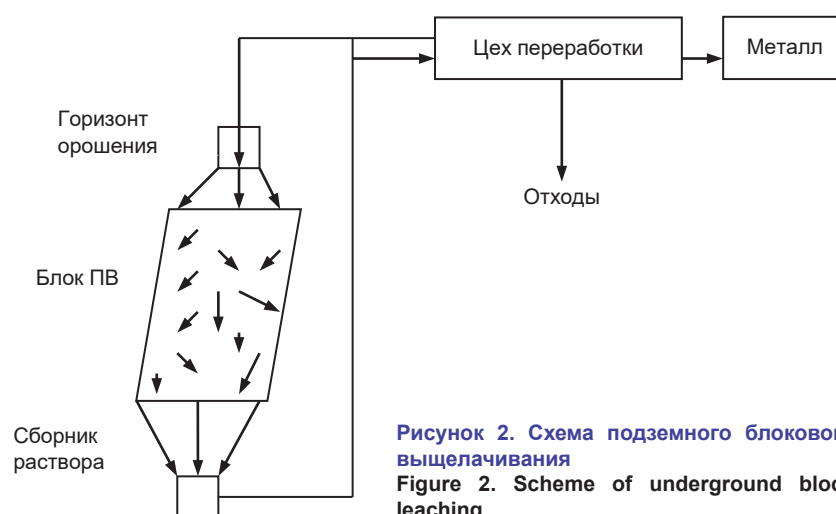


Рисунок 2. Схема подземного блокового выщелачивания
Figure 2. Scheme of underground block leaching

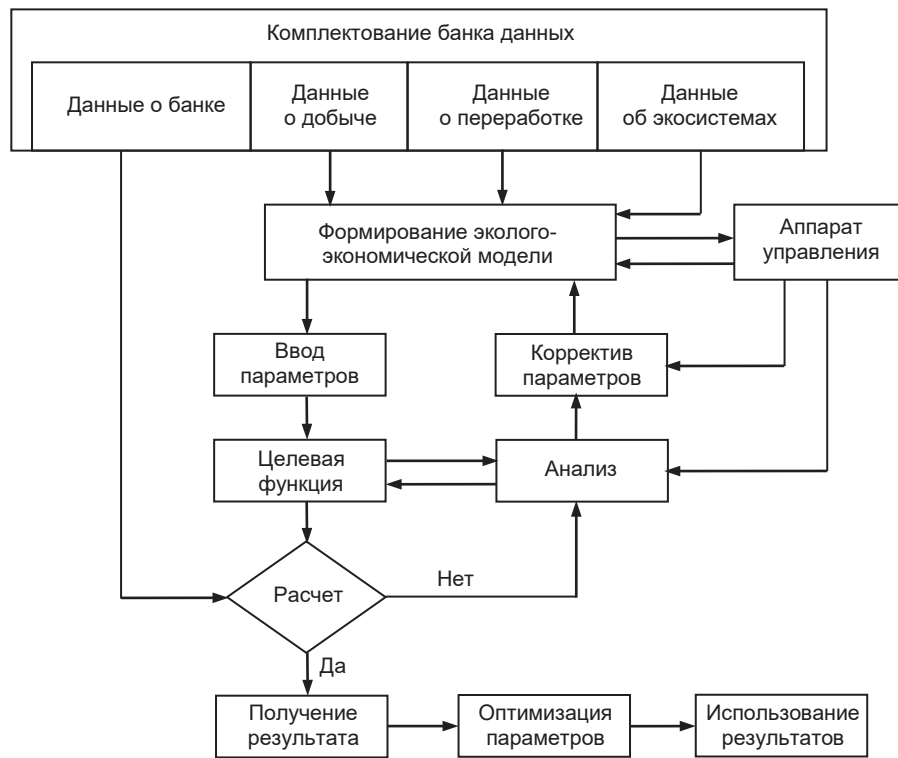


Рисунок 3. Алгоритм управления процессом выщелачивания
Figure 3. Algorithm for controlling the leaching process

Снижение температуры процесса уменьшает выделение атомарного хлора, а увеличение – перенапряжение кислорода и выход продуктов окисления, поэтому оптимальным значением температуры растворения сульфидов является 60–80 °С.

Кольматация снижает скорость фильтрации раствора, особенно при крупности руд 0,1–0,2 мм. Для извлечения металлов из таких руд пульпу перемешивают с достаточной для данных условий скоростью, используя аппараты механической активации: дезинтеграторы, мельницы и др.

Подземное блоковое выщелачивание осуществляется по схеме (рис. 2).

Выщелачивание комплексных руд характеризуется отличительными особенностями: медные минералы требуют повышенного расхода реагента; сурьма снижает содержание кислорода; а углистые компоненты увеличивают потери металлов.

Снижение темпа выщелачивания со временем корректируют воздействием на процесс, в том числе:

- *химическим*: окислителями, поверхностно-активными веществами, бактериями и т. п.;
- *физическим*: электромагнитными полями, давлением, температурой, взрывом и т. п.;
- *технологическим*: подача пирита, пиrolюзита и т. п.

Эффективность подземного блокового выщелачивания зависит от успеха создания благоприятных условий для пленочно-капельного движения раствора.

Выбор элементов управления параметрами выщелачивания осуществляется по схеме (рис. 3).

Количество металла, переведенного в мобильную фазу:

$$Q = g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n,$$

где $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$ – количество металла по стадиям процесса.

Продолжительность выщелачивания:

$$t_q = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n,$$

где t_1, t_2, \dots, t_n – продолжительность стадий процесса.

Скорость перехода металла в раствор в единицу времени:

$$g_q = \frac{Q}{t_q}.$$

Взаимозависимость продолжительности выщелачивания и извлечения металлов в продуктивный раствор интерпретируется рис. 4.

Количество переведенных в производственный раствор металлов:

$$Q_0 = T_0 g_b,$$

где T_0 – время контакта реагента с рудой.

Количество блоков выщелачивания в работе:

$$N = \frac{Q_0}{Q} = \frac{T_0 g_b}{Q}.$$

Производительность выщелачивания одного блока:

$$Q_m = S \cdot V \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot c \cdot \gamma,$$

где S – орошаемая площадь блока, м²; V – скорость фронта выщелачивания, м/с; λ_1 – коэффициент извлечения металла из руды в раствор; λ_2 – коэффициент извлечения металла из раствора; c – содержание металла в руде, %; γ – объемный вес руды в разрыхленном состоянии, кг/м³.

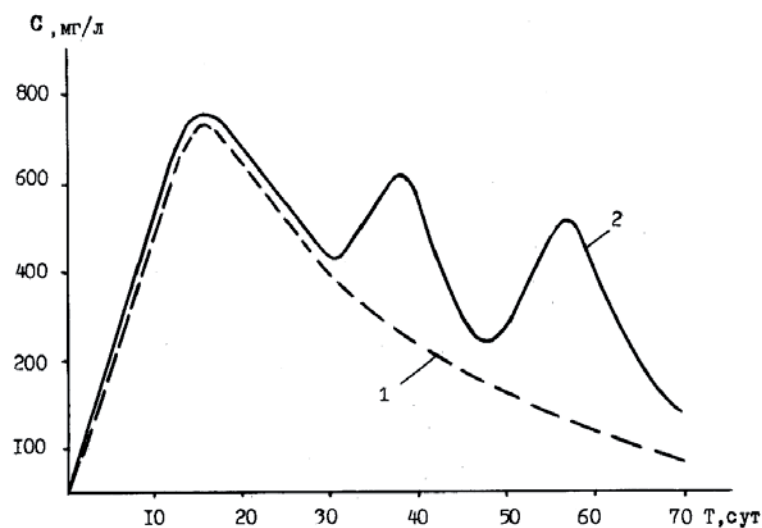


Рисунок 4. Взаимозависимость продолжительности выщелачивания T и извлечения металлов в раствор C : 1 – по традиционной технологии с выщелачиванием; 2 – по технологии с интенсификацией процесса

Figure 4. Interdependence between the duration of leaching T and the extraction of metals into solution C : 1 – according to the traditional technology with leaching; 2 – according to the technology including process intensification

Систематизация и разработка алгоритма управления процессом выщелачивания цветных металлов из некондиционного по содержанию сырья способствует рационализации производства с возвращением в оборот дорогого, дефицитного и опасного при хранении минерального сырья [12–16].

Заключение

Эффективность выщелачивания зависит от успеха создания благоприятных условий для пленочно-капельного движения раствора. При выщелачивании металлосодержащего сырья приоритетна роль крупности руд и степень их ассоциации с пиритом и арсенопиритом.

Оптимальным значением температуры растворения сульфидов является 60–80 °С. Медные минералы требуют повышенного расхода реагента, сурьма снижает содержание кислорода, а углистые компоненты увеличивают потери металлов. Продолжительность выщелачивания и степень извлечения металлов связаны коррелятивно.

Разработка алгоритма управления процессом выщелачивания металлов из технологически вскрываемого некондиционного по содержанию сырья способствует рационализации производства с возвращением в производство омертвленного минерального сырья.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 24-17-20033, <https://rscf.ru/project/24-17-20033/>

ЛИТЕРАТУРА

- Golik V. I., Klyuev R. V., Martyshev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant // *Metallurgist*. 2023. Vol. 66. No. 11-12. P. 1476–1480. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01462-y>
- Golik V. I., Klyuev R. V., Martyshev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing // *Metallurgist*. 2023. Vol. 67. No. 1-2. P. 96–103. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01493-5>
- Валиев Н. Г., Пропп В. Д., Абрамкин Н. И., Камболов Д. А. Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья и отходов обогащения руд // ГИАБ. 2023. № 12-1. С. 17–30. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_121_0_17
- Golik V. I., Klyuev R. V., Martyshev N. V., Kondratiev V. V., Tynchenko V. S., Gladkikh V. A., Iushkova L. V., Brigida V. Reuse and Mechanochemical Processing of Ore Dressing Tailings Used for Extracting Pb and Zn // *Materials*. 2023. No. 16. Issue 21. Article number 7004. <https://doi.org/10.3390/ma16217004>
- Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., Golev A. Re-Thinking Mining Waste Through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Issue 5. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
- Валиев Н. Г., Пропп В. Д., Вандышев А. М. Кафедре горного дела УГГУ – 100 лет // *Известия вузов. Горный журнал*. 2020. № 8. С. 130–143. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-130-143>
- Мальшев Ю. Н., Титова А. В. Твердые отходы промышленности – как основа формирования дополнительной минерально-сырьевой базы стратегического сырья РФ // *Маркшейдерия и недропользование*. 2014. № 1. С. 23–32. <https://elibrary.ru/rxwtgn>
- Пухова В. П., Воропанова Л. А. Очистка сточных вод горно-перерабатывающих предприятий путем использования природных продуктов // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2019. Т. 11. № 2. С. 134–141.
- Козаченко В. И., Воробьев Е. Д., Разоренов Ю. И. К концепции извлечения металлов при утилизации отходов обогащения руд // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 10. С. 18–24. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/43364>
- Yang Y., Qiu W., Liu Z., Song J., Wu J., Dou Z., Wang J., Wu J. Quantifying the impact of mineralogical heterogeneity on reactive transport modeling of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching of uranium // *Acta Geochimica*. 2022. Vol. 41. P. 50–63. <https://doi.org/10.1007/s11631-021-00502-1>
- Palaniandy S. Impact of mechanochemical effect on chalcopyrite leaching // *International Journal of Mineral Processing*. 2015. Vol. 136. P. 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.10.005>

12. Рассказова А. В., Секисов А. Г., Кирильчук М. С., Васьянович Ю. А. Стадийно-активационное выщелачивание окисленных медно-золотых руд: теория и технология // Eurasian Mining. 2020. № 1. С. 52–55. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.10>
13. Adero N. J., Drebenstedt C., Prokofeva E. N., Vostrikov A. V. Spatial data and technologies for geomonitoring of land use under aspect of mineral resource sector development // Eurasian Mining. 2020. No. 1. P. 69–74. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.14>
14. Xie H., Zhao J. W., Zhou H. W., Ren S. H., Zhang R. X. Secondary utilizations and perspectives of mined underground space // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 96. Article number 103129. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103129>
15. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020. Vol. 37. Issue 5. P. 1385–1399. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>
16. Валиев Н. Г., Головырин С. С., Макаров В. В. К вопросу об использовании систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства (проблематика решения задач современного горного производства с использованием мультиагентных систем) // ГИАБ. 2017. № S23. С. 134–139. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-23-134-139>

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2024 года

Algorithm for leaching metals from substandard raw materials

Vladimir Ivanovich GOLIK^{1*}

Niyaz Gadym ogly VALIEV^{2**}

Vladimir Sergeevich BRIGIDA^{3***}

Stanislav Aleksandrovich MASLENNIKOV^{4****}

Maksim Sergeevich LEBZIN^{2*****}

¹Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of RAS, Republic of North Ossetia – Alania, Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

³Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia

⁴Institute of Service and Entrepreneurship, Shakhty Branch of Don State Technical University, Russia

Abstract

The aim of the work is to detail the concept of increasing the efficiency of metal production by leaching substandard ores and tailings of primary processing. The algorithm for controlling the leaching processes of non-ferrous ores of substandard metal content, in general, but there are many unresolved problems on the way to mastering this technology on an industrial scale. There are a lot of non-extracted metals in the tailings of enrichment, which has negative consequences.

The research methodology provides an analysis of the theory and practice of extracting metals into a production solution. The methodological basis of the phenomenon of activation of the leaching process is a change in the properties of metal-containing raw materials through exposure to it. The results of analytical and laboratory studies form the basis for making recommendations. The basis of the phenomenon of activation of the leaching process is a change in the properties of metal-containing raw materials through force action on it.

Results. The mechanism of the phenomenon of the reagent transfer of metal into soluble compounds has been clarified. The dependence of the throughput capacity of the rock mass on the ratio of the pore diameter to the diameter of the suspensions, as well as the size of the ore pieces and the degree of their association with iron-containing minerals, has been quantified. The features of underground block leaching of ores of various metals and methods of process correction are given. The quantitative parameters of the conditions for ensuring the film-drop movement of the leaching solution of reagents are determined. An algorithm for selecting controls for leaching parameters has been developed. Parameters of leaching indicators for alternative technologies are compared.

Conclusions. It is proved that the development of an algorithm for controlling the process of leaching metals from substandard raw materials contributes to the return of valuable and scarce mineral raw materials to the production sector.

Keywords: metal, leaching, ore, enrichment tailings, extraction, impact, blocks, algorithm, technologies.

The research was carried out in supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-17-20033, <https://rscf.ru/project/24-17-20033/>

REFERENCES

1. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyshev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. 2023, Technology for Nonwaste Recovery of Tailings of the Mizur Mining and Processing Plant. *Metallurg*, vol. 66, no. 11-12, pp.1476–1480. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01462-y>
2. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyshev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. 2023, Prospects for Return of Valuable Components Lost in Tailings of Light Metals Ore Processing. *Metallurg*, vol. 67, no. 1-2, pp. 96–103. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01493-5>
3. Valiev N. G., Propp V. D., Abramkin N. I., Kambolov D. A. 2023, Practice of using leaching of metals from substandard raw materials and waste enriched with ore. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 12-1, pp. 17–30. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_121_0_17
4. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyshev N. V., Kondratiev V. V., Tynchenko V. S., Gladkikh V. A., Iushkova L. V., Brigida V. 2023, Reuse and Mechanochemical Processing of Ore Dressing Tailings Used for Extracting Pb and Zn. *Materials*, to. 16, issue 21, Article number 7004. <https://doi.org/10.3390/ma16217004>
5. Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., Golev A. 2019, Re-Thinking Mining Waste Through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations. *Minerals*, vol. 9, issue 5, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
6. Valiev N. G., Propp V. D., Vandyshev A. M. 2020, The 100th Anniversary of the Department of Mining Engineering of UrSMU. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 8, pp. 130–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-130-143>

✉v.i.golik@mail.ru

**gtf.gd@m.ursmu.ru

***1z011@inbox.ru

****mail@sssu.ru

*****az_ma@mail.ru

7. Malyshev Yu. N., Titova A. V. 2014, Solid mine wastes as a foundation of the supplementary mineral and raw materials base of strategic materials in Russia. *Marksheyderiya i nedropol'zovaniye* [Surveying and subsoil use], no. 1, pp. 23–32. (In Russ.) <https://elibrary.ru/rxwtpn>
8. Pukhova V. P., Voropanova L. A. 2019, Treatment of wastewater from mining and processing enterprises by using natural products. *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable development of mountain areas], vol. 11, no. 2, pp. 134–141. (In Russ.)
9. Komashchenko V. I., Vorobyov E. D., Razorenov Yu. I. 2017, Extraction of metals when recycling enrichment of ores. *Izvestiya TPU. Inzhiniring georesursov* [News of the Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering], vol. 328, no. 10, pp. 18–24. (In Russ.) URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/43364>
10. Yang Y., Qiu W., Liu Z., Song J., Wu J., Dou Z., Wang J., Wu J. 2022, Quantifying the impact of mineralogical heterogeneity on reactive transport modeling of CO₂ + O₂ in-situ leaching of uranium. *Acta Geochimica*, vol. 41, pp. 50–63. <https://doi.org/10.1007/s11631-021-00502-1>
11. Palaniandy S. 2015, Impact of mechanochemical effect on chalcopyrite leaching. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 136, pp. 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.10.005>
12. Rasskazova A. V., Sekisov A. G., Kirilchuk M. S., Vasyanovich Yu. A. 2020, Staged-activation leaching of oxidized copper-gold ore: Theory and technology, *Eurasian Mining*, no. 1, pp. 52–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.10>
13. Adero N. J., Drebenstedt C., Prokofeva E. N., Vostrikov A. V. 2020, Spatial data and technologies for geomonitoring of land use under aspect of mineral resource sector development, *Eurasian Mining*, no. 1, pp. 69–74. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.14>
14. Xie H., Zhao J. W., Zhou H. W., Ren S. H., Zhang R. X. 2020, Secondary utilizations and perspectives of mined underground space. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 96, Article number 103129. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103129>
15. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 37, issue 5, pp. 1385–1399. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>
16. Valiev N. G., Golovyryn S. S., Makarov V. V. 2017, On the issue of using artificial intelligence systems in audit procedures of modern mining production (Solving problems of modern mining production using multi-agent systems). *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. S23, pp. 134–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-23-134-139>

The article was received on April 23, 2024