

УДК 504.06

Приоритетные направления переработки отвальной породы угольных шахт для получения редких металлов

А. В. Харламова¹, Е. И. Верех-Белоусова²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Российская Федерация, Луганская Народная Республика, 291034, Луганск, квартал Молодежный, 20А

Для цитирования: Харламова А. В., Верех-Белоусова Е. И. Приоритетные направления переработки отвальной породы угольных шахт для получения редких металлов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1053–1059. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1053-1059

Аннотация

Цель: Исследовать и обосновать возможность получения редких металлов из отвальной породы угольных шахт Луганской Народной Республики. Исследовать минералогический состав складированных отходов угольных шахт и биохимические процессы, протекающие в них. **Методы:** Проведение эксперимента по биохимическому кислотному выщелачиванию образцов отвальной породы с применением культуры сульфатредуцирующих микроорганизмов Th. Ferrooxidans. Получение чистой культуры микроорганизмов Th. Ferrooxidans с использованием общепринятых микробиологических методик. **Результаты:** Разработан метод, и предложена технология получения редких металлов галлия и германия из отвальной породы угольных шахт с использованием естественных процессов формирования серной кислоты в породе. В ходе эксперимента эффективность выщелачивания германия составила 1,6 мг/кг породы, а галлия — до 2 мг/кг отвальной породы. Это позволяет рассматривать подобные отходы как потенциальное металлоносное сырье, а для региона — получить положительный экологический и экономический эффект. **Практическая значимость:** Предложенный способ дает возможность утилизировать отвальнную породу со снижением негативного действия отвалов на окружающую среду и получением редких металлов.

Ключевые слова: Углепородные отвалы, редкие металлы, алюминий, германий, галлий, биохимическое выщелачивание, серная кислота, бактерии Th. Ferrooxidans.

Введение

Горнодобывающая отрасль в Российской Федерации имеет одно из ключевых стратегических значений для экономики страны. Занимая лидирующие позиции в мире по запасам угля и других полезных ископаемых, Россия выступает важным экспортёром на международном рынке. Однако интенсификация угледобычи влечет ряд негативных последствий для окружающей среды. В настоящее время в России и в мире сложилась критическая ситуация с образованием

и накоплением промышленных отходов, в том числе в горной промышленности. Крупнотонажные отходы — неотъемлемая часть процесса угледобычи. Они складируются на территории шахт и оказывают существенное негативное воздействие на окружающую среду. Для его минимизации необходимо утилизировать отвальнную породу. Наиболее экономически перспективный способ утилизации — использование отвальной породы в качестве сырьевого ресурса. Это позволит повысить экономическую эффективность

и снизить вред, наносимый природе. Один из основных путей максимально полного использования отходов — внедрение малоотходных технологий. Однако переработка отходов зачастую характеризуется низкой экономической эффективностью. Поэтому отходы рассматриваются как альтернативный источник сырья лишь в тех случаях, когда это одновременно экологически обосновано и экономически целесообразно.

Донецкая и Луганская Народные Республики, как промышленно развитые регионы, на сегодняшний день имеют ряд проблем, связанных с утилизацией промышленных отходов. В республиках практически отсутствуют специализированные предприятия по утилизации или нейтрализации отходов производства. Основной их объем приходится на предприятия добычи и обогащения угля. Так, в Луганской Народной Республике насчитывается около 556 породных отвалов, из которых около 70 горят [1]. Такие крупнотоннажные отходы создают серьезную антропогенную нагрузку на экологическое состояние региона, загрязняя продуктами ветровой и водной эрозии прилегающие к отвалам территории.

Современные исследователи в научных трудах изучают различные методы переработки отходов добычи и обогащения угля. В частности, в работах [2–8] предлагается использовать отвальной породу для производства строительных материалов и удобрений, а также в качестве сырья для извлечения металлов. Поскольку проблема утилизации крупнотоннажных отходов угледобычи до сих пор не решена, она остается актуальной.

Одним из наиболее перспективных направлений утилизации или частичной переработки таких отходов может выступать использование их для получения редких элементов (металлов), а также производства строительных материалов для промышленного и дорожного строительства.

Цель работы состояла в исследовании возможности получения редких металлов из отваль-

ной породы угольных шахт Луганской Народной Республики.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ минералогического состава отвальной породы показал, что в ней преобладают минералы кремния, железа и алюминия, а также изоморфно замещенные редкоземельные и ценные металлы [9, 7].

В качестве объектов исследований были выбраны четыре породных отвала угольных шахт, которые располагаются на территории Луганской Народной Республики. Был проведен спектральный анализ образцов отвальной породы, по результатам которого установлено присутствие высокого содержания редких и ценных металлов, а превышение кларков и приближение к минимальной промышленной концентрации приходится на галлий и германий. Согласно источникам [10–12], отмечается постоянное присутствие германия в углях, при этом его содержание может быть повышенено в сульфидных и силикатных минералах (> 1 %). Поскольку галлий имеет сходство кристаллохимических, химических и атомных свойств с железом, цинком и алюминием, значительная его часть рассеяна в каменных углях и минералах [11–13]. В связи с этим представляет интерес возможность использования отвальной породы угольных шахт в качестве сырьевого ресурса для получения галлия и германия методом биохимического выщелачивания, что и предложено в данной работе.

После отсыпки отвальной породы в насыпи (терриконы) внутри них запускаются непрерывные биохимические и геохимические процессы преобразования, сопровождающиеся формированием и выделением новых минералов (новообразований). Ключевую роль в этих гео- и биохимических процессах играет серная кислота. Минеральные сернистые соединения представляют собой совокупность сульфидной серы (FeS_2)

и сульфатной серы (FeSO_4 , CaSO_4 и др.). Серная кислота, преобразующая минералы отвальных пород, может иметь как геохимическое, так и биохимическое происхождение [9]. Если отвальная порода увлажняется кислыми шахтными водами перед отсыпкой на поверхность, в уже складированной массе запускаются процессы развития бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* (Th. ferrooxidans). Основное место их обитания — кислые воды сульфидных руд угольных месторождений. При благоприятных для бактерий условиях на каждый миллилитр геохимически производимой серной кислоты приходится 4 мл, образуемой в результате их жизнедеятельности [9].

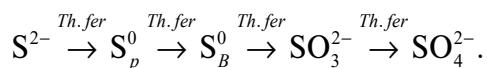
Кроме того, если доля токсичных сульфидных пород в отвале превышает 20 %, такая отвальная порода приобретает ряд свойств, оказывающих значительное негативное влияние на прилегающие территории. Повышенная активная кислотность породы приводит к росту содержания подвижных форм тяжелых металлов, сульфатов алюминия и железа, а также обменного водорода.

С капиллярной влагой в породу поступают растворы серной кислоты, вследствие чего увеличивается концентрация подвижных форм ценных металлов, алюминия, изоморфно замещенных редкоземельных металлов и кремниевой кислоты [9, 14].

Такое геохимическое преобразование отвальной породы зачастую представляет собой необратимый процесс, а его негативные последствия для окружающей среды весьма значительны. Однако эти изменения можно эффективно использовать для естественного биохимического выщелачивания металлов из отвальной породы.

Th. ferrooxidans — грамотрицательная палочковидная бактерия, аэроб, большинство штаммов относится к облигатным автотрофам, для которых оптимум кислотности среды лежит в диапазоне 2,0–2,5. Как источник энергии для Th. ferrooxidans необходимы: тиосульфат, сера, сальфат- и суль-

фидные ионы (S^{2-} , SO_4^{2-}), соли двухвалентного железа, окисляют Fe^{2+} к Fe^{3+} [9, 15]. Схема окисления бактериями сульфидной серы до сульфат-иона выглядит следующим образом [9]:



Кислотность среды изменяется под действием микроорганизмов, которые окисляют соответствующее количество сульфидной серы.

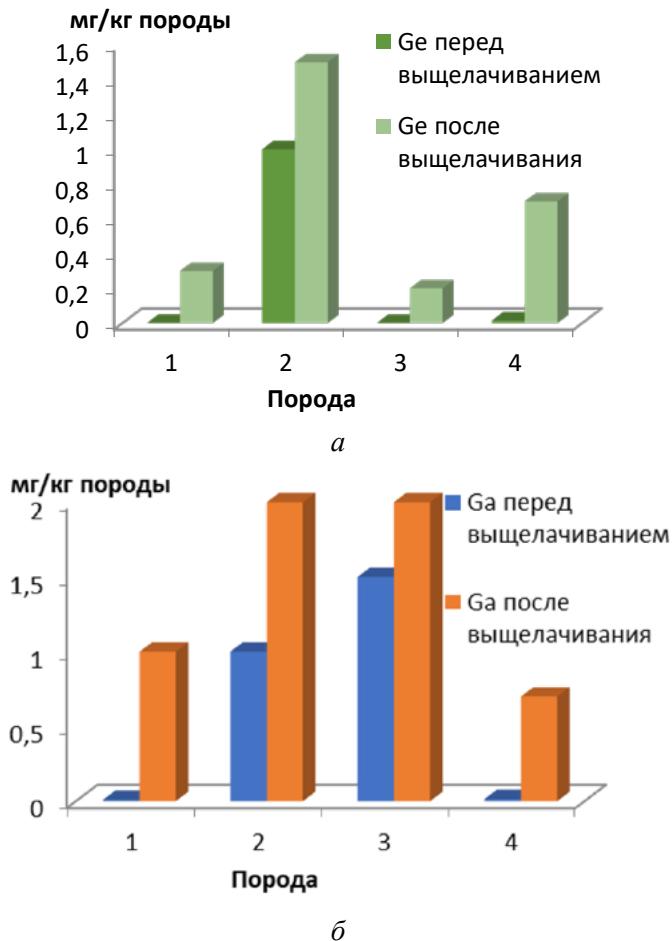
В лабораторных условиях был проведен процесс биохимического выщелачивания германия и галлия (Ge, Ga) из отвальной породы. Культура микроорганизмов Th. ferrooxidans выделялась из образцов согласно общепринятым микробиологическим методикам [16] на среду Сильвермана и Ландгрена [9, 16]. Затем однократно орошались образцы породы растворами выделенной чистой культуры. Содержание перешедших в раствор германия и галлия определялось на восьмые сутки проведения опыта по их выщелачиванию (рисунок).

На основании полученных результатов установлено, что происходит выщелачивание изоморфно замещенных металлов (Ge, Ga) из отвальной породы угольных шахт за счет биохимической активности микроорганизмов Th. ferrooxidans. Следует отметить, что велика вероятность замещения германием солей двухвалентного железа в сульфидных минералах породы и галлием солей трехвалентного алюминия и двухвалентного железа в алюмосиликатных соединениях. Эффективность проведенного выщелачивания германия в опыте достигла 1,6 мг/кг породы, а галлия — до 2 мг/кг отвальной породы.

По результатам проведенного исследования предложена технологическая схема получения редких металлов (Ga, Ge) путем кучного биохимического бактериального выщелачивания из отвальной породы угольных шахт.

Метод включает следующие этапы:

1. Складирование добытой отвальной породы в кучи на специально оборудованных площадках.



Результаты биохимического выщелачивания:

a — германия, *б* — галлия; 1 — сильный метаморфизм (отвал шахты г. Свердловска), 2 — сильный метаморфизм (отвал шахты г. Антрацита), 3 — средний метаморфизм (отвал шахты г. Луганска), 4 — слабый метаморфизм (отвал шахты г. Лисичанска)

2. Орошение куч подготовленными бактериальными растворами.

Для улучшения аэрации кучи формируют послойно, отсыпая отвальной породу, отсортированную по фракциям.

Бактерии повышают кислотность породы за счет выделения серной кислоты, что приводит к выщелачиванию изоморфно замещенных редких металлов, включая германий и галлий.

Ключевыми факторами, определяющими скорость и эффективность процесса выщелачивания, являются:

- общее количество сульфидной серы;
- аэрация отвальной породы;

- гранулометрический состав породы;
- степень метаморфизма породы;
- концентрация бактериальных клеток в растворе;
- высота рудной кучи.

Существенным экономическим преимуществом является возможность использования под промплощадки территорий закрытых шахт. Такие площадки обладают рядом достоинств:

- сохранена транспортная и промышленная инфраструктура;
- близкое расположение к шахте породных отвалов добычи и обогащения угля.

Выводы

Внедрение современных технологий утилизации промышленных отходов позволит повысить уровень экологической и экономической безопасности страны. Важным этапом утилизации отвальной породы угольных шахт является максимальное извлечение всех полезных свойств, присущих данному виду промышленных отходов. Поэтому предложенная схема кучного бактериального выщелачивания редких металлов (германия и галлия) из грунтов породных отвалов является обоснованной: она позволяет при небольших материальных затратах минимизировать негативное воздействие породы на окружающую среду и получить ценные металлы. Однако основной проблемой предложенных мероприятий по переработке отвальной породы угольных шахт является расчет себестоимости промышленного получения металлов таким способом. Полученные результаты требуют дальнейших исследований в этой области для установления более точных параметров и зависимостей предложенного процесса выщелачивания, а также для оценки экономической эффективности.

Список источников

- Луганщина — край нашей любви и надежды. По материалам годового отчета состояния окружающей среды в Луганской области в 2012 году / Под ред. А. О. Арапова. — Луганск, 2013. — 187 с.
- Баталин Б. С. Строительная керамика из терриконников Кизеловского угольного бассейна / Б. С. Баталин, Т. А. Белозерова, М. Ф. Гайдай // Стекло и керамика. — 2014. — № 3. — С. 8–10.
- Шпирт М. Я. Использование твердых отходов добычи и переработки углей / М. Я. Шпирт, В. Б. Артемьев, С. А. Силютин. — М.: «Горное дело», ООО «Киммерийский центр», 2013. — 432 с.
- Shpirt M. Ya. Ecological problems caused by mining and processing with suggestions for remediation / M. Ya. Shpirt, A. K. M. Rainbow. — Millpress, 2006. — 162 p.
- Nifantov B. F. Mineral resources of Kuzbass for complex deposits providing realization of innovative technologies of deep re-processing of coal and ores / B. F. Nifantov // Twenthy-fifth Annual International Pittsburg coal Conference. Sept. 29 — Oct. 2, 2008. Pittsburg, Pensilvania. — 2008. — Pp. 20–23.
- Буравчук Н. И. Использование материалов из горелых пород шахтных отвалов в дорожном строительстве / Н. И. Буравчук, О. В. Гурьянова, Г. Н. Пак // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. — 2014. — № 6. — С. 75–80.
- Зубова Л. Г. Получение металлов из терриконов угольных шахт Донбасса: монография / Л. Г. Зубова, А. Р. Зубов, Е. И. Верех-Белоусова, Н. В. Олейник. — Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2012. — 144 с.
- Гайдай М. Ф. Оценка негативного воздействия терриконников на экологическую ситуацию в угледобывающих районах и пути его снижения / М. Ф. Гайдай, Я. И. Вайсман // Экологические системы и приборы. — 2015. — Вып. 12. — С. 11–21.
- Зборщик М. П. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений / М. П. Зборщик, В. В. Осокин. — Донецк: ДонГТУ, 1996. — 178 с.
- Поваренных М. Ю. Аутигенная редкометалльная минерализация в Ге-угольных месторождениях Приморья: проявление нового природного феномена — избирательной сепарации редкоземельных элементов / М. Ю. Поваренных, М. Я. Шпирт, А. В. Кнотько // Материалы конференции «Годичное собрание РМО 2014. Минералогия во всем пространстве сего слова». — СПб.: Российское минералогическое общество, 2014. — С. 57–61.
- Yudovich Ya. E. Coal inclusions in sedimentary rocks: a geochemical phenomenon / Ya. E. Yudovich // International Journal of Coal Geology. — 2003. — Vol. 56. — № 3/4. — Pp. 203–222.
- Клер В. Р. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Геохимия элементов / В. Р. Клер, Г. А. Волкова, Е. М. Гурвич. — М.: Наука, 1987. — 237 с.

13. Дымов А. И. Аналитическая химия галлия (Серия «Аналитическая химия элементов») / А. И. Дымов. — М.: Наука, 1978. — 256 с.
14. Смирный М. Ф. Экологическая безопасность терриконовых ландшафтов Донбасса: монография / М. Ф. Смирный, Л. Г. Зубова, А. Р. Зубов. — Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2006. — 232 с.
15. Кузнецов С. И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд / С. И. Кузнецов, Г. И. Каравайко. — М.: Наука, 1972. — 248 с.
16. Аркадьева З. А. Промышленная микробиология / З. А. Аркадьева; под общ. ред. Н. С. Егорова. — М.: Высшая школа, 1989. — 686 с.

Дата поступления: 27.08.2025
Решение о публикации: 14.10.2025

Контактная информация:

ХАРЛАМОВА Алина Вадимовна — канд. техн. наук, доц.; alavina@yandex.ru
ВЕРЕХ-БЕЛОУСОВА Екатерина Иосифовна — канд. техн. наук, доц.; kate3152@yandex.ru

Key Technologies for Treating Coal-Mining Wastes And Extracting Rare Earth Metals.

A. V. Kharlamova¹, E. I. Verekh-Belousova²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Lugansk Vladimir Dahl State University, 20a, Molodezhny kvartal., Lugansk, 91034, Lugansk People's Republic, Russian Federation

For citation: Kharlamova A. V., Verekh-Belousova E. I. Key Technologies for Treating Coal-Mining Wastes and Extracting Rare Earth Metals // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1053–1059. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1053-1059

Summary

Purpose: To investigate and validate the feasibility of extracting rare earth metals from coal-mining byproducts in the Lugansk People's Republic. This involves analyzing the mineralogical composition of accumulated waste at coal mines and examining the biochemical processes taking place within. **Methods:** Conducting experiments on biochemical acid leaching of waste rock samples using a culture of sulfate-reducing Thioferrooxidans microorganisms. Additionally, a pure culture of Thioferrooxidans microorganisms will be obtained through established microbiological techniques. **Results:** A method has been developed and a technology has been proposed for obtaining the rare metals of gallium and germanium from coal-mine waste rock through the natural processes of sulfuric acid formation within the rock. Experimental results indicated that the leaching efficiency of germanium reached 1.6 mg/kg of rock while gallium achieved up to 2 mg/kg of waste rock. This suggests that such waste can be regarded as a potential source of metal-bearing raw materials, providing both environmental and economic benefits for the region. **Practical significance:** The proposed method will facilitate the utilization of waste rock, thereby minimizing the adverse environmental impacts associated with waste and promoting the production of rear earth metals.

Keywords: Coal waste deposits, rare metals, aluminum, germanium, gallium, biochemical leaching, sulfuric acid, Thioferrooxidans bacteria.

References

1. Arapov A. O. (ed.) *Luganshchina — kray nashey lyubvi i nadezhdy. Po materialam godovogo otcheta sostoyaniya okruzhayushchey sredy v Luganskoy oblasti v 2012 godu* [Luganshchina — the land of our love and hope. Based on the materials of the annual report on the state of the environment in the Lugansk region in 2012]. Lugansk, 2013, 187 p. (In Russian)
2. Batalin B. S., Belozerova T. A., Gayday M. F. Stroitel'naya keramika iz terrikonnikov Kizelovskogo ugol'nogo basseyna [Construction ceramics from spoil heaps of the Kizel coal basin]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics]. 2014, Iss. 3, pp. 8–10. (In Russian)
3. Shpirt M. Ya., Artem'ev V. B., Silyutin S. A. *Ispol'zovanie tvyordykh otkhodov dobychi i pererabotki ugley* [Use of solid waste from coal mining and processing]. Moscow: "Gornoe delo" Publ., OOO "Kimmeriyskiy tsentr" Publ., 2013, 432 p. (In Russian)
4. Shpirt M. Ya., Rainbow A. K. M. Ecological problems caused by mining and processing with suggestions for remediation. Millpress, 2006, 162 p.
5. Nifantov B. F. Mineral resources of Kuzbass for complex deposits providing realization of innovative technologies of deep re-processing of coal and ores. Twenty-fifth Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 29 — October 2, 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, 2008, pp. 20–23.
6. Buravchuk N. I., Gur'yanova O. V., Pak G. N. *Ispol'zovanie materialov iz gorelykh porod shakhtnykh otvalov v dorozhnym stroitel'stve* [Use of materials from burnt rock of mine dumps in road construction]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences]. 2014, Iss. 6, pp. 75–80. (In Russian)
7. Zubova L. G., Zubov A. R., Verekh-Belousova E. I., Oleynik N. V. *Poluchenie metallov iz terrikonov ugol'nykh shakht Donbassa: monografiya* [Extraction of metals from coal mine spoil heaps in Donbass: monograph]. Lugansk: VNU im. V. Dalya Publ., 2012, 144 p. (In Russian)
8. Gayday M. F., Vaysman Ya. I. Otsenka negativnogo vozdeystviya terrikonikov na ekologicheskuyu situatsiyu v ugledobivvayushchikh rayonakh i puti ego snizheniya [Assessment of the negative impact of spoil heaps on the ecological situation in coal mining areas and ways to reduce it]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices]. 2015, Iss. 12, pp. 11–21. (In Russian)
9. Zborshchik M. P., Osokin V. V. *Predotvraschenie ekologicheskikh vrednykh proyavlenii v porodakh ugol'nykh mestorozhdenii* [Prevention of ecologically harmful manifestations in coal deposit rocks]. Donetsk: DonGTU Publ., 1996, 178 p. (In Russian)
10. Povarennykh M. Yu., Shpirt M. Ya., Knot'ko A. V. Autigennaya redkometall'naya mineralizatsiya v Ge-ugol'nykh mestorozhdeniyakh Primor'ya: proyavlenie novogo prirodного fenomena — izbirat'noy separatsii redkozemel'nykh elementov [Autogenic rare-metal mineralization in Ge-coal deposits of Primorye: manifestation of a new natural phenomenon — selective separation of rare earth elements]. *Materialy konferentsii "Godichnoe sobranie RMO 2014. Mineralogiya vo vsem prostranstve sego slova"* [Proceedings of the Conference "Annual Meeting of the Russian Mineralogical Society 2014. Mineralogy in the Whole Space of This Word"]. Saint Petersburg: Rossiyskoe mineralogicheskoe obshchestvo Publ., 2014, pp. 57–61. (In Russian)
11. Yudovich Ya. E. Coal inclusions in sedimentary rocks: a geochemical phenomenon. *International Journal of Coal Geology*. 2003, vol. 56, Iss. 3/4, pp. 203–222.
12. Kler V. R., Volkova G. A., Gurvich E. M. *Metallogeniya i geokhimiya uglenosnykh i slantsesoderzhashchikh tolshch SSSR. Geokhimiya elementov* [Metallogeny and geochemistry of coal-bearing and shale-bearing strata of the USSR. Geochemistry of elements]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 237 p. (In Russian)
13. Dymov A. I. *Analiticheskaya khimiya galliya (Seriya "Analiticheskaya khimiya elementov")* [Analytical chemistry of gallium (Series "Analytical Chemistry of Elements")]. Moscow: Nauka Publ., 1978, 256 p. (In Russian)
14. Smirny M. F., Zubova L. G., Zubov A. R. *Ekologicheskaya bezopasnost' terrikonovykh landshaftov Donbassa: monografiya* [Ecological safety of spoil heap landscapes in Donbass: monograph]. Lugansk: VNU im. V. Dalya Publ., 2006, 232 p. (In Russian)
15. Kuznetsov S. I., Karavayko G. I. *Rol'mikroorganizmov v vyshchelachivanii metallov iz rud* [Role of microorganisms in metal leaching from ores]. Moscow: Nauka Publ., 1972, 248 p. (In Russian)
16. Arkad'eva Z. A.; Egorov N. S. (ed.). *Promyshlennaya mikrobiologiya* [Industrial microbiology]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1989, 686 p. (In Russian)

Received: August 27, 2025

Accepted: October 14, 2025

Author's information:

Alina V. KHARLAMOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; alavina@yandex.ru

Ekaterina I. VEREKH-BELOUSOVA — PhD
in Engineering, Associate Professor; kate3152@yandex.ru