

УДК 504.55.054:622(470.6)

О ПОЛНОТЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА В ШТАБЕЛЕ

Голик Владимир Иванович^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович³,
yiri1963@mail.ru

Мицик Михаил Федорович⁴,
m_mits@mail.ru

¹ Северо-Кавказский государственный технологический университет,
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

² Московский политехнический университет,
Россия, 107023, г. Москва, Б. Семеновская, 38.

³ Южно-Российский государственный политехнический университет,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

⁴ Донской государственный технический университет,
Россия, 346527, г. Шахты, ул. Шевченко 147.

Актуальность проблемы повышения эффективности использования извлеченных из недр на земную поверхность металло-содержащих минеральных ресурсов объясняется возрастающей потребностью промышленности в металлах для удовлетворения жизненных запросов человека.

Целью исследования является разработка природо- и ресурсосберегающей технологии добычи металлов при подземной разработке металлических месторождений полезных ископаемых.

Методика исследования включает в себя комплекс методов, совокупно определяющих целесообразность вовлечения в производство некондиционных металло-содержащих ресурсов с использованием гидromеталлургических технологий и повышающих извлечение металлов по сравнению с традиционными технологиями обогащения. Основным методом является полупромышленный эксперимент выщелачивания урановой руды в штабеле.

Результаты исследования позволяют оптимизировать организацию работ по выщелачиванию металла путем регулирования технологических параметров на всех стадиях выщелачивания некондиционного минерального сырья в штабеле с дифференцированной оценкой влияния основных технологических процессов на показатели выщелачивания. Приведены данные о расходе реагентов и материалов, извлечении металлов в раствор и из раствора, а также нейтрализации маточного раствора. Показано, что выщелачивание в штабеле не радикально повышает показатели традиционных методов извлечения металлов, а лишь уменьшает содержание металлов во вторичных хвостах. Обозначены недостатки существующих методов оценки влияния горного производства на окружающую среду. Результаты исследования могут быть востребованы при разработке металлических руд в горнодобывающих отраслях.

Выводом из результатов исследования является заключение о том, что выщелачивание в штабеле не решает проблемы безотходности, по существу увеличивая время воздействия химически опасных продуктов на живое вещество.

Ключевые слова:

Руда, штабель, выщелачивание, природа, извлечение в раствор, экология.

Введение

Темпы добычи сырья на протяжении всей истории человечества опережают возможности его переработки, о чем свидетельствуют прогрессивно увеличивающиеся объемы металло-содержащих хвостов. Увеличение потребности минеральных ресурсов и исчерпаемость запасов эксплуатируемых месторождений стимулируют поиск новых технологий, среди которых наибольшие ожидания связаны с методами получения металлов из ранее считавшихся некондиционными запасов руд [1–4].

Воздействие горного производства на геологические ландшафты омертвляет продукты труда, усиливая деградацию флоры и фауны [1], а применяемые меры предотвращения ущерба окружающей среде нередко повышают опасность, так как создают в замкнутой среде опасность генерации мобильных продуктов.

Общепризнано, что дальнейшее увеличение объемов хранения хвостов переработки чревато глобальной катастрофой. Выходом из сложившейся ситуации может быть только утилизация накопленного техногенного сырья.

При некотором содержании металлов в минеральном сырье их извлечение может быть экономически целесообразными. Утилизация хвостов методами традиционных технологий считается невыгодным делом, потому что в соответствии с современными законами большая доля наносимого окружающей среде ущерба не компенсируется производителем, а перекладывается на общество. Это не стимулирует производителей металла к поискам безотходных технологий.

Актуальность проблемы увеличилась в связи с переходом горных предприятий на подземный способ

разработки месторождений, который немаловажен без закладки выработанного пространства твердеющими смесями, но при использовании хвостов обогащения в качестве сырья не извлеченные металлы трансформируются в мобильное состояние и влияют на экосистемы окружающей среды [5–9].

Ресурсосберегающие технологии востребованы уже сейчас, потому что продукты утилизации хвостов обогащения являются сырьем для производства товарных продуктов не только в горном производстве, но и в смежных отраслях.

Вовлечение в сферу производства ранее неиспользуемого минерального ресурса может обеспечить по-

лучение многопланового эколого-экономического эффекта. Приоритетным направлением при этом считается выщелачивание металлов из руд и хвостов обогащения руд с переводом металлов в растворы, а затем – в товарные осадки.

Выщелачивание металлов в промышленных масштабах применяют с середины прошлого века для получения золота, меди, урана. Гидрохимические процессы выщелачивания в штабелях позволяют извлекать из хвостов добычи и переработки большую часть ранее теряемых полезных компонентов (рис. 1), поэтому представляют собой существенный шаг в решении проблемы безотходности [10–13].

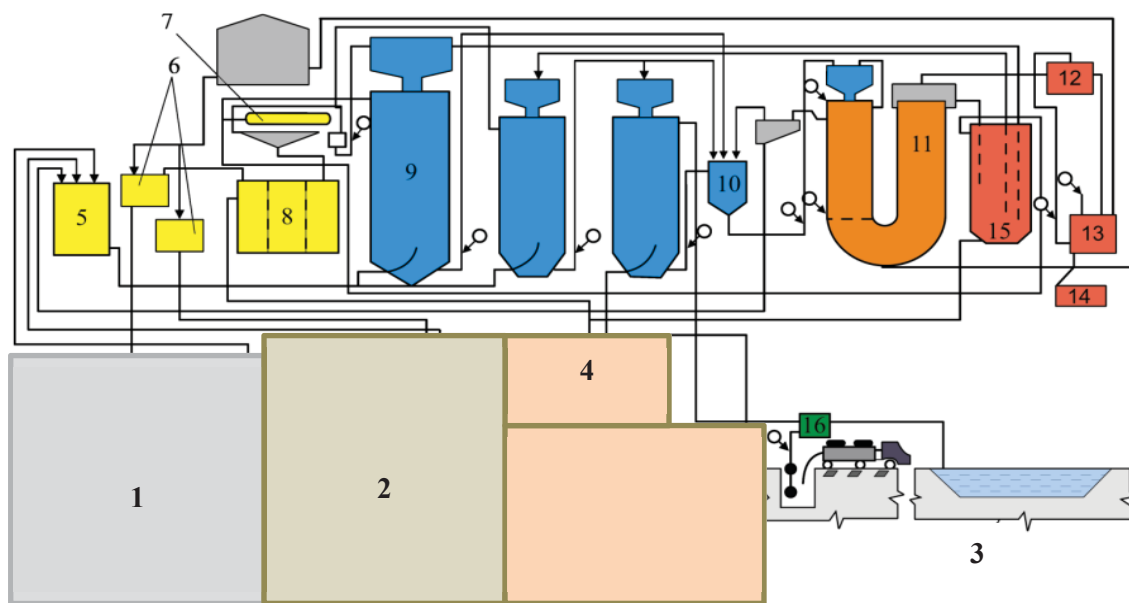


Рис. 1. Комплекс по извлечению металлов в раствор: 1 – блок подземного выщелачивания; 2 – штабель; 3 – отвал; 4 – пруд; 5–8 – оборудование для подготовки руд; 9–11 – оборудование сорбции-десорбции; 12–16 – вспомогательное оборудование

Fig. 1. Scheme of complex ore leaching processing: 1 – underground leaching unit; 2 – stack; 3 – dump; 4 – pond; 5–8 – ore preparation equipment; 9–11 – sorption-desorption equipment; 12–16 – auxiliary equipment

Целью исследований в этом направлении является создание методов безотходной переработки металлических руд выщелачиванием, отвечающих требованиям природо- и ресурсосбережения.

С целью разработки природо- и ресурсосберегающей технологии извлечения металлов из некондиционного сырья произведена теоретическая и экспериментальная оценка соответствия технологии выщелачивания в штабеле концепции безотходности горного производства и проведен анализ процессов выщелачивания урановой руды в штабеле на предприятии урановой отрасли.

Методы

Для использования хвостов обогащения в составе твердеющих смесей необходимо повысить эффективность выщелачивания металлов за счет использования новых технических решений [14].

Месторождение полезных ископаемых, как геометрический объект, характеризуется комплексом горно-геологических, горнотехнических и других по-

казателей (признаков) как полезных ископаемых, так и вмещающих их пород (1):

$$\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

Каждый из признаков описывается в пространственной системе координат (2):

$$\begin{cases} X_1 = F_1(f_1(\bar{x}, \bar{X}), \varphi_1(\bar{x}, \bar{X})); \\ X_2 = F_2(f_2(\bar{x}, \bar{X}), \varphi_2(\bar{x}, \bar{X})); \\ \dots \\ X_n = F_n(f_n(\bar{x}, \bar{X}), \varphi_n(\bar{x}, \bar{X})), \end{cases} \quad (2)$$

где $f_i(\bar{x}, \bar{X})$ – функция, описывающая закономерную составляющую пространственно-факторного поля; $\varphi_i(\bar{x}, \bar{X})$ – функция, описывающая случайную составляющую поля и оценивающая дисперсию модели.

При образовании хвостов обогащения зависимость между характерными признаками пространственно-факторных полей X_i подобна зависимости (1) с различием в значениях полей концентрации частиц урана в сторону их уменьшения (табл. 1–4).

Коэффициенты трендов $f_i(\bar{x}, \bar{X})$ зависят от вклада каждого признака в суммарный результат. Поиск тренда определяется результатами испытаний: внутренними – по оценке значимости коэффициентов регрессии в модели и внешними – на соответствие значения показателя доли новой технологии.

Возможности альтернативных технологий определяются экспериментально. Результаты выщелачивания руды в штабеле сравниваются с результатами традиционного агитационного выщелачивания.

Результаты

Исследуемое месторождение Восток (Республика Казахстан) локализовано в аргиллитах и включает в себя прожилковые вкрапленные руды прочностью 6 по М.М. Протодьяконову.

Химический состав руды, %: SiO_2 – 60; Al_2O_3 – 16; Fe_2O_3 – 2; FeO – 6; MnO – 0,2; MgO – 5; CaO – 7;

Na_2O – 1,0; K_2O – 0,2; P_2O_5 – 0,5; $S_{\text{общ}}$ – 0,5; $C_{\text{общ}}$ – 2,5; $C_{\text{орг}}$ – 0,35; U – 0,063 [6].

Выщелачивание руды в штабеле является частью промышленного комплекса по извлечению металлов в раствор (рис. 1).

Комплекс переработки руд включал в себя процессы:

- сортировка руд по содержанию металла;
- сортировка руд по крупности;
- строительство штабеля выщелачивания;
- перевод металлов в раствор;
- осаждение урана на сорбенте;
- десорбция урана;
- нейтрализация маточников сорбции с утилизацией осадка.

Расход реагентов и материалов на выщелачивание урана в штабеле характеризуется рис. 2.

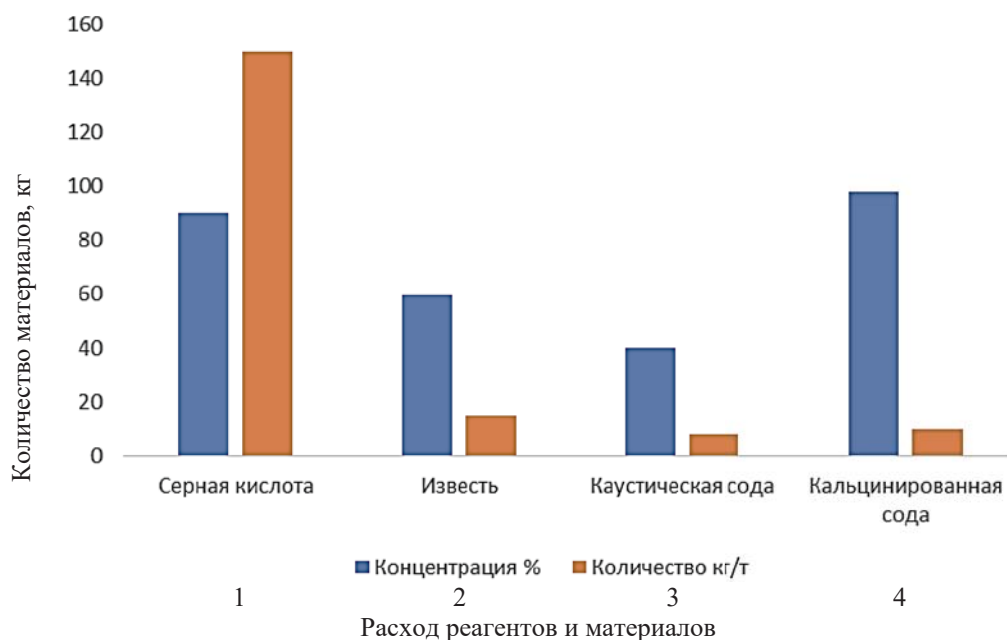


Рис. 2. Сведения о реагентах и материалах: 1 – серная кислота; 2 – известь; 3 – каустическая сода; 4 – кальцинированная сода (слева – концентрация, %, справа – расход, кг/т)

Fig. 2. Information about reagents and materials: 1 – sulfuric acid; 2 – lime; 3 – caustic soda; 4 – soda ash (on the left – concentration, %, on the right – consumption, kg/t)

Продуктивные растворы собирались в отстойных картах, откуда поступали на сорбцию с противоточным движением. Уран осаждался, а маточники и растворы объединяли с маточными растворами. Смола перегружалась на регенерацию. Кристаллы диураната натрия осаждали кальцинированной содой, а фильтрат направляли на приготовление растворов.

Обобщенные показатели выщелачивания урана в штабеле приведены рис. 3.

Для установления закономерностей выщелачивания урана из некондиционного сырья были проведены эксперименты по извлечению металлов традиционной технологией и новым методом выщелачивания в штабеле (табл. 1).



Рис. 3. Показатели выщелачивания урана в штабеле
Fig. 3. Indicators of uranium leaching in the stack

Таблица 1. Показатели процента выщелачивания урана в штабеле с течением времени

Table 1. Indicators of the proportion of uranium leaching in the stack over time

Время, сутки/Time, day	1	2	3	5	7
Технология/Technology					
Традиционная/Traditional	1	2	5	11	20
Предлагаемая/Proposed	2	4	10	20	30
Время, сутки/Time, day	10	20	30	50	90
Технология/Technology					
Традиционная/Traditional	30	50	58	70	75
Предлагаемая/Proposed	45	63	75	83	85

Для описания показателей процента выщелачивания урана в штабеле с течением времени предлагается зависимость в виде (3):

$$P = P_r(1 - e^{-a_1 t}), \quad (3)$$

где a_1 – коэффициент, учитывающий долю извлеченного металла; t – продолжительность выщелачивания урана в штабеле, с; P_r – предельное извлечение урана, %; P – извлечение урана, %.

Результаты расчетов на основе проведенных испытаний представлены в среде Maple (рис. 4).

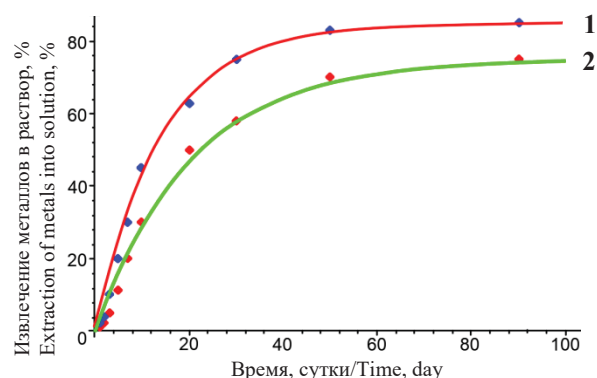


Рис. 4. Извлечение металлов в зависимости от продолжительности выщелачивания при альтернативных технологиях: 1 – агитационное выщелачивание; 2 – выщелачивание в штабеле

Fig. 4. Extraction of metals depending on the duration of leaching with alternative technologies: 1 – agitation leaching; 2 – stack leaching

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белодедов А.А. Обоснование эффективной области применения технологических схем мощности разрабатываемого пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S28. – С. 3–10.
- Полухин О.Н., Комащенко В.И. Природоохранная концепция добычи и переработки минерального сырья в центральном федеральном округе России на примере белгородского региона // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Естественные науки. – 2014. – Т. 29. – № 23 (194). – С. 180–186.
- Muga-Piątek U. Landscape management on post-exploitation land using the example of the Silesian region, Poland // Environmental & Socio-economic Studies. – 2014. – V. 2 (1). – P. 1–8.
- Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes / D.M. Franks, D.V. Boger, C.M. Côte, D.R. Mulligan // Resources Policy. – 2011. – V. 36. – № 2. – P. 114–122.
- Parker H.M. Reconciliation principles for the mining industry // Mining Technology. – 2012. – V. 121(3). – P. 160–176.
- Освоение забалансовых запасов металлических руд / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, Е.И. Захаров, Н.И. Абрамкин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 3. – С. 158–170.
- Рыльникова М.В. Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Специальный выпуск. – 2014. – Т. 2. – С. 25–32.
- Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В. Комплексный анализ генетических особенностей минерального вещества и технологических свойств полезных компонентов Джезказганского месторождения. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 11. – № 3 (41). – С. 321–330.
- Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход / В.С. Бригида, Х.Х. Кожиев, А.А. Сарян, А.К. Джиоева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 20–32.
- Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 49–52.

Значения коэффициентов корреляции по регрессионным зависимостям для традиционной технологии и для предлагаемой технологии приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения параметров выщелачивания

Table 2. Values of leaching parameters

Технологии/Technologies	Коэффициент выщелачивания/Leaching coefficient	Коэффициент регрессии/Regression coefficient	Коэффициент корреляции/Correlation coefficient
Традиционная/Traditional	0,75	–0,049	0,93
Предлагаемая/Proposed	0,85	–0,072	0,94

При исходном содержании металла 0,063 % в хвостах штабелевого выщелачивания осталось не извлеченными 0,02 % металла.

Установлено, что технология выщелачивания урана из некондиционного сырья в штабеле характеризуется наличием металла во вторичных хвостах, поэтому не является безотходной.

Выщелачивание металлов из природного и техногенного сырья может быть экономически приемлемым для горного предприятия [15–20].

Полученные результаты корреспондируют с данными зарубежных специалистов [21–24].

Заключение

Выщелачивание урана в штабеле позволяет уменьшить потери металла в хвостах и улучшить экономико-экологические показатели горного предприятия, но не является безотходным процессом, поскольку вторичные хвосты не удовлетворяют предельно допустимым концентрациям.

В то же время выщелачивание в штабеле осложняет дальнейшие процессы утилизации ввиду снижения возможности дальнейшей деметаллизации хвостов.

В качестве безотходного метода извлечения металлов из бедного металлического сырья может быть рекомендована технология с механохимической активацией некондиционного сырья в дезинтеграторе, хорошо зарекомендовавшая себя при выщелачивании полиметаллических руд, железистых кварцитов и углей.

11. Metal extraction in the case of non-waste disposal of enrichment tailings / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, O. Burdzieva // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 10. – P. 213–217.
12. Исследование влияния активационной обработки на галитовые отходы обогащения при приготовлении закладочной смеси / Ч.Б. Конгар-Сюрюн, В.В. Фараджов, Ю.С. Тюляева, А.М. Хайрутдинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 1. – С. 43–57.
13. Святецкий В.С., Солодов И.Н. Стратегия технологического развития уранодобывающей отрасли России // Горный журнал. – 2014. – № 8. – С. 67–74.
14. Повышение безопасности подземной добычи руд учетом геодинамики массива / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, Ю.В. Дмитрак, О.З. Габараев // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 8. – С. 36–42.
15. Golik V.I., Hasheva Z.M. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste // Medwell Journals. The Social Sciences. – 2015. – № 10 (5). – P. 682–686.
16. Improvement of the backfilling characteristics by activation of halite enrichment waste for non-waste geotechnology / A. Khayrutdinov, Ch. Kongar-Syuryun, T. Kowalik, V. Faradzhov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 867 (1). – 012018.
17. Freeman A.M., Herriges J.A., Kling C.L. The measurement of environmental and resource values. Theory and methods. – New York, USA: RFF Press, 2014. – 325 p.
18. Земсков А.Н., Лискова М.Ю. Пути обеспечения безопасных условий труда горняков на основе автоматизации контроля производственных процессов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 1. – С. 82–88.
19. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10 (4). С. 70–100.
20. Корнилков С.В., Яковлев В.Л. О методологическом подходе к исследованиям в области освоения недр на основе системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 135–142.
21. Gallardo A.H., Matsuzald T., Aoki H. Geological storage of nuclear wastes: insights following the Kuchikushima crisis // Energy Policy. – 2014. – V. 73. – P. 391–400.
22. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of raper: challenges and future prospects // Hydrametallurgy. – 2015. – V. 157. – P. 206–224.
23. Сепеда-Перес Э., Де Йонг Н. Динамика наночастиц золота на границе раздела твердое тело: жидкость, изученная методом жидкофазной электронной микроскопии // Микроскопия и микроанализ. – 2019. – Т. 25. – Вып. S1. – С. 43–44.
24. Vrancken C., Langhurst P.J., Waland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // Waste Management. – 2017. – V. 61. – P. 40–57.

Поступила 22.06.2022 г.

Прошла рецензирование 19.09.2022 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета; профессор, профессор кафедры металлургии Московского политехнического университета.

Разоренов Ю.И., доктор технических наук, профессор, ректор Южно-Российского государственного политехнического университета.

Мицик М.Ф., кандидат технических наук, доцент кафедры математики и прикладной информатики, Институт сферы обслуживания и предпринимательства, филиал Донского государственного технического университета.

UDC 504.55.054:622(470.6)

ON THE COMPLETENESS OF URANIUM LEACHING IN THE STACK

Vladimir I. Golik^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Yuri I. Razorenov³,
yiri1963@mail.ru

Mikhail F. Mizik⁴,
m_mits@mail.ru

¹ North-Caucasian mining and metallurgical institute (state technological university),
44, Nikolaev avenue, Vladikavkaz, 362021, Russia.

² Moscow Polytechnic University,
38, B. Semenovskaya street, Moscow, 107023, Russia.

³ South Russian State Polytechnic University,
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

⁴ Institute of Service and Entrepreneurship, branch of DSTU in Shakhty,
147, Shevchenko street, Shakhty, 346527, Russia.

The relevance of the problem of increasing the efficiency of using the metallic mineral resources extracted from the bowels on the earth's surface is explained by the increasing demand of industrial metals to meet the vital queries of the human.

The aim of the study is to develop environment-friendly and resource-saving technologies of extracting metals from sub-standard raw materials in underground mining of metallic mineral deposits

Research methodology includes a set of methods that collectively define the feasibility of involvement in production of non-conforming metallic resources using hydrometallurgical technologies and increasing the extraction of metals compared to traditional washing technology. The main method is semi-experimental leaching of uranium ore in the pile.

The results of the research allow us to optimize the organization of work on leaching metals by controlling the process parameters at all stages of leaching of off-grade mineral raw materials in the stacks with a differentiated assessment of the influence of major processes on leaching rates. The paper introduces the data on consumption of reagents and materials, extraction of metals into solution and out of solution and neutralization of the mother liquor. It is shown that leaching in the pile does not radically improve performance of traditional methods of extraction of metals, but only reduces the metal content in the secondary tails. The paper identifies the deficiencies of existing methods of assessing the impact of mining on the environment.

The conclusion from the results of the study is that leaching in a stack does not solve the problem of non-waste, essentially increasing the exposure time of chemically hazardous products to living matter.

Key words:

Ore, stack, leaching, nature, extraction into solution, ecology.

REFERENCES

- Belodedov A.A. Substantiation of the effective field of application of technological power schemes of the developed reservoir. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2019, no. S28, pp. 3–10. In Rus.
- Polukhin O.N., Komashchenko V.I. Environmental concept of extraction and processing of mineral raw materials in the Central Federal District of Russia on the example of the Belgorod region. *Scientific bulletin of Belgorod State University. Natural sciences*, 2014, vol. 29, no. 23 (194), pp. 180–186. In Rus.
- Maiga-Pietek U. Landscape management on lands after exploitation on the example of the Silesian region, Poland. *Environmental and socio-economic research*, 2014, vol. 2 (1), pp. 1–8.
- Franks D.M., Boger D.V., Kot K.M., Mulligan D.R. Principles of sustainable development for waste disposal of mining and processing of minerals. *Policy in the field of resources*, 2011, Iss. 36, no. 2, pp. 114–122.
- Parker H.M. Principles of harmonization for the mining industry. *Mining equipment*, 2012, vol. 121 (3), pp. 160–176.
- Golik V.I., Razorenov Yu.I., Zakharov E.I., Abramkin N.I. Development of off-balance sheet reserves of metal ores. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*, 2018, no. 3, pp. 158–170. In Rus.
- Rylnikova M.V. Conditions for the sustainable functioning of the mineral resource complex of Russia. Mining information and analytical bulletin. *Special edition*, 2014, vol. 2, pp. 25–32. In Rus.
- Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V. Complex analysis of the genetic characteristics of mineral matter and technological properties of useful components of the Dzhez-Kazgan deposit. *Sustainable development of mountain territories*, 2019, vol. 11, no. 3 (41), pp. 321–330. In Rus.
- Brigida V.S., Kojiev H.H., Saryan A.A., Dzhoieva A.K. Spatial-temporal problems of geoecology – an interdisciplinary approach. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 4, pp. 20–32. In Rus.
- Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from tailings of processing plants and their complex use. *Metallurgical and mining industry*, 2015, no. 3, pp. 49–52. In Rus.
- Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal extraction during waste-free disposal of enrichment tailings. *Metallurgical and mining industry*, 2015, no. 10, pp. 213–217. In Rus.
- Kongar-Syuryun Ch.B., Faradzov V.V., Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M. Investigation of the effect of activation treatment on halite enrichment waste during the preparation of the filling mixture. *Mining information and analytical Bulletin*, 2021, no. 1, pp. 43–57. In Rus.
- Svyatetsky V.S., Solodov I.N. Strategy of technological development of the uranium mining industry in Russia. *Mining Journal*, 2014, no. 8, pp. 67–74. In Rus.
- Golik V.I., Razorenov Yu.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z. Improving the safety of underground ore mining taking into account

- the geodynamics of the massif. *Occupational safety in industry*, 2019, no. 8, pp. 36–42. In Rus.
15. Golik V.I., Khasheva Z.M. Economic efficiency of waste disposal related mining Enterprises. *Medwell Journals. The Social Sciences*, 2015, no. 10 (5), pp. 682–686.
 16. Khairutdinov A., Kongar-Suryun Ch., Kovalik T., Faradzhev V. Improving backfill characteristics by activating halite enrichment waste for waste-free geotechnology. *IOP conference series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 867 (1), 012018.
 17. Freeman A.M., Herriges J.A., Kling K.L. Measurement of environmental and resource values. *Theory and methods*. New York, USA, RFF Press, 2014, 325 p.
 18. Zemskov A.N., Leskova M.Yu. Ways of ensuring safe working conditions for miners based on automation of control of production processes. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*, 2018, no. 1, pp. 82–88. In Rus.
 19. Chotchaev H.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high-altitude territories. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2020, no. 10 (4), pp. 70–100. In Rus.
 20. Kornilkov S.V., Yakovlev V.L. On the methodological approach to research in the field of subsoil development based on consistency, complexity, interdisciplinarity and innovation orientation. *Mining Journal*, 2015, no. 1, pp. 135–142. In Rus.
 21. Gallardo A.H., Matsuzald T., Aoki H. Geological storage of nuclear waste: conclusions after the Kukushima crisis. *Energy policy*, 2014, vol. 73, pp. 391–400.
 22. Sinclair L., Thompson J. Leaching of rapier in situ: problems and prospects. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 157, pp. 206–224.
 23. Cepeda-Pérez E., De Jong N. Dynamics of gold nanoparticles at the solid: liquid interface studied by liquid-phase electron microscopy. *Microscopy and Microanalysis*, 2019, vol. 25, Iss. S1, pp. 43–44. In Rus.
 24. Vrancken C., Langhurst P.J., Waland S.T. A critical review of methods for determining the characteristics of solid waste in real time: informing about the recovery of materials and fuel production. *Waste management*, 2017, vol. 61, pp. 40–57.

Received: 22 June 2022.

Reviewed: 19 September 2022.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, North-Caucasian mining and metallurgical institute; professor, Moscow Polytechnic University.

Yuri I. Razorenov, Dr. Sc., professor, South Russian State Polytechnic University.

Mikhail F., Mizik, Cand. Sc., associate professor, Institute of Service and Entrepreneurship.