

УДК 622.732.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4625
Шифр специальности ВАК: 25.00.22

Эффективность комбинирования геотехнологий при добыче золота

В.И. Голик✉

Московский политехнический университет, Россия, г. Москва

✉v.i.golik@mail.ru

Аннотация. *Целью* работы является моделирование процесса комбинирования технологий добычи золота для повышения эффективности его вскрытия и оптимизации капитальных и эксплуатационных затрат, исходя из того, что экономические показатели производства зависят от сочетания возможностей технологий добычи и переработки руд. **Методология.** Решение поставленных задач обеспечивается комплексным изучением и обоснованием эффективных вариантов золотодобывающего производства. Этапы исследования включают в себя этапы освоения месторождения от анализа перспектив до разработки модели и алгоритма оценки. Основным методом доказательства является лабораторный и промышленный эксперимент для вариантов выщелачивания, в том числе: агитационное, агитационное после активации в сухом состоянии и с механохимической активацией в дезинтеграторе. Результаты лабораторных и натурных исследований положены в основу рекомендаций по модернизации технологий добычи и переработки руд. **Результаты и их анализ.** Приведены результаты анализа разработки месторождений золота и технологий их разработки. Обоснована целесообразность переработки некондиционного для традиционных технологий металлосодержащего сырья. Показана роль производства золота выщелачиванием металлов из хвостов обогащения упорных сульфидных руд. Обосновано, что поддержание мощности горных предприятий связано с вовлечением в переработку хвостов обогащения технологически вскрываемых руд. Определены цели и задачи совершенствования методов комбинирования технологий разработки месторождений золота. Приведена методика комплексного изучения процессов и закономерностей выщелачивания золота на этапах разработки золоторудных месторождений. Рекомендован алгоритм извлечения золота кучным выщелачиванием. Приведены примерные количественные показатели практического извлечения золота. **Выводы.** Учет факторов комбинирования геотехнологий комплексного освоения месторождений при определенных условиях обеспечивает прибыль за счет эффективного использования ресурсов.

Ключевые слова: золото, комбинирование, технология, добыча, обогащение, сырье, выщелачивание, обоснование, дезинтегратор

Для цитирования: Голик В.И. Эффективность комбинирования геотехнологий при добыче золота // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 3. – С. 38–43. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4625

UDC 622.732.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4625

Effectiveness of combining geotechnologies when mining gold

V.I. Golik✉

Moscow State Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉v.i.golik@mail.ru

Abstract. Aim. To simulate combination of gold mining technologies to increase the efficiency of its opening and optimize costs. The efficiency of metal extraction depends on a combination of the possibilities of extraction and enrichment technologies for metal-containing raw materials. The methodology of the research includes a comprehensive study of physico-chemical processes and the establishment of patterns of gold leaching, as well as the justification of the possibility of

rationalization of gold mining production options. **Methodology.** Comprehensive study of the processes and patterns of gold leaching at the stages of field development; models for assessing the impact of mining on the environment; algorithms for gold extraction by hydrometallurgical and heap methods and in disintegrators; algorithm for selecting the parameters of gold leaching from tailings of enrichment and poor ores. Quantitative indicators of the practical extraction of gold by leaching are given. **Results and their analysis.** The author has substantiated the expediency of processing substandard metal-containing raw materials. The paper demonstrates the role of gold production by leaching metals from resistant sulfide ores. It is proved that maintaining the capacity of mining enterprises is associated with the involvement of technologically opened ores in the processing of tailings. The author defined the goals and objectives of improving the methods of combining technologies for the development of gold deposits. **Conclusions.** Taking into account the factors of combining geotechnologies of integrated field development under certain conditions ensures profit through the efficient use of resources.

Keywords: gold, combination, technology, extraction, enrichment, raw materials, leaching, justification, disintegrator

For citation: Golik V.I. Effectiveness of combining geotechnologies when mining gold. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 38–43. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4625

Введение

Месторождения золота характеризуются разнообразием условий локализации в природе, что объясняет многообразие технологий их разработки. Золото добывают не только из золотых руд, но и из таких, в которых основными являются другие металлы. Подземная разработка жильных месторождений золота отличается большей трудоемкостью, чем разработка других месторождений.

Повышение рыночной цены на золото стимулирует его производство. Для этого становится целесообразным перерабатывать бедные и труднообогатимые руды, дорабатывать законсервированные запасы, перерабатывать отходы добычи и переработки руд.

Совершенствование технологий делает рентабельной переработку отходов с содержанием золота от 1,0 г/т.

В рамках конверсии технологий добычи золота от традиционных технологий к новым физико-химическим технологиям важным резервом увеличения производства золота является выщелачивание металлов из некондиционного сырья [1–3], в том числе из отходов и хвостов горного и обогащенного переделов [4, 5].

Основные надежды поддержания мощности предприятий связаны с вовлечением в переработку техногенных запасов хвостов обогащения руд, количество которых в добывающих странах увеличивается с ростом объемов добычи полезных ископаемых [6].

Добыча золота из техногенных месторождений создает предпосылки для реализации стратегии увеличения производства технологически вскрываемых руд [7–9].

Практикой подтверждено, что при переработке сырья с содержанием золота от 0,5 г/т затраты на извлечение золота выщелачиванием с активацией в быстроходных мельницах-дезинтеграторах намного меньше затрат при выщелачивании в перколяторах и активаторах [10].

Цель работы – увеличение производства металлов и оздоровление окружающей среды запасов путем переработки отходов. Цель достигается решением задач, в том числе:

обоснованием эколого-экономической целесообразности выщелачивания золота из некондиционного и теряемого в недрах и отвалах сырья; оптимизацией методов разработки природных и техногенных месторождений технологиями с выщелачиванием.

Методика

Решение поставленных задач обеспечивается комплексным изучением и обоснованием эффективных вариантов золотодобывающего производства.

Этапы исследования включают в себя:

- анализ перспектив селективной добычи золота;
- моделирование показателей;
- экспериментальное извлечение золота по известным схемам;
- установление закономерностей выщелачивания в дезинтеграторе;
- разработку мер по управлению энергией взрыва при отбойке руд;
- формулирование принципов комбинирования этапов разработки;
- разработку модели и алгоритма оценки [11, 12].

Целесообразность извлечения золота новыми технологиями обосновывается экспериментально для каждого варианта выщелачивания, в том числе:

- агитационным выщелачиванием;
- агитационным выщелачиванием после активации в сухом состоянии;
- выщелачиванием растворами реагентов активацией в дезинтеграторе с вариацией соотношения «жидкого к твердому».

Результаты лабораторных и натурных исследований положены в основу рекомендаций по модернизации технологий добычи и переработки руд.

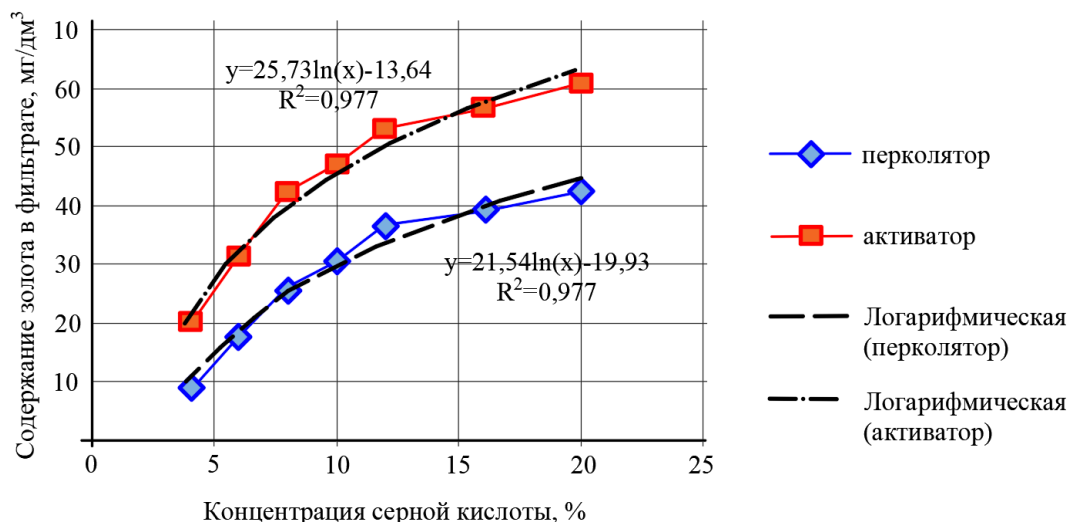


Рис. 1. Зависимость извлечения золота от способа активации процесса
Fig. 1. Dependence of gold extraction on the process activation method

Результаты

К прорывным технологиям получения золота относится выщелачивание металлов из минерального сырья в быстроходных мельницах – дезинтеграторах с механохимической активацией процессов, где выщелачивающий реагент запрессовывается в образующиеся от механической деформации пород трещины.

Экспериментальная проверка возможности извлечения металлов осуществлена на хвостах обогащения полиметаллических руд Садонского месторождения (Республика Северная Осетия – Алания) и железистых кварцитов Курской магнитной аномалии. Комбинированная механохимическая активация золотосодержащего сырья при выщелачивании в дезинтеграторе повышает извлечение металлов в исследованных условиях на 2–70 % от их содержания в отходах и уменьшает время выщелачивания металлов на два порядка.

Показатели извлечения золота в раствор при прочих одинаковых условиях выщелачивания описываются графиком с логарифмической интерполяцией (рис. 1).

Алгоритм выбора параметров процесса выщелачивания золота из хвостов и бедных руд представлен на рис. 2.

Из сравнения показателей извлечения золота в раствор следует, что выщелачивание в активаторах намного превышает извлечение в перколяторах, что подтверждается логарифмической интерпретацией. Влияние на процесс выщелачивания количества реагентов наиболее проявляется при концентрации серной кислоты в диапазоне 5–10 %.

Для решения задач современного горного производства с использованием мультиагентных си-

стем предлагаются новые подходы, например, системы искусственного интеллекта [13–15].

Вопросы эффективности комбинирования геотехнологий при добыче металлов исследованы в работах зарубежных специалистов данного направления горного дела [16–20].

Комплексный учет технологических, экономических и экологических факторов комбинирования геотехнологий улучшает показатели горного предприятия. Комбинированная технология является реальным шагом к выживанию предприятий горной промышленности в условиях рыночной экономики.

Выводы

1. В рамках конверсии технологий добычи золота резервом увеличения его производства является выщелачивание металлов из отходов и хвостов горного и обогащательного переделов технологически вскрываемых руд.
2. К прорывным технологиям получения золота относится выщелачивание в быстроходных мельницах-дезинтеграторах с механохимической активацией процессов, где выщелачивающий реагент запрессовывается в образующиеся от механического воздействия трещины.
3. На хвостах обогащения полиметаллических руд Садонского месторождения (Республика Северная Осетия – Алания) и железистых кварцитов Курской магнитной аномалии экспериментально определено, что выщелачивание с комбинированной механохимической активацией металлосоодержащего сырья в дезинтеграторе повышает извлечение металлов на 2–70 %.
4. Результаты исследования подтверждаются логарифмической интерполяцией процессов извлечения золота.



Рис. 2. Алгоритм выбора технологии выщелачивания из хвостов и бедных руд

Fig. 2. Algorithm for choosing leaching technology from tailings and poor ores

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория и практика кучного выщелачивания золота / Б.Б. Бейсембаев, Б.К. Кенжалиев, Х.К. Абсалямов, Б.Д. Лерман, Б.С. Лузин, А.П. Доронин. – Алматы: Гылым, 1998. – 168 с.
2. Technology for nonwaste recovery of tailings of the Mizur mining and processing plant / V.I. Golik, R.V. Klyuev, N.V. Martyushev, D.A. Zyukin, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2023. – Vol. 66. – № 11–12. – P. 1476–1480. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-y.
3. Козырев Е.Н. Научные основы физико-химической геотехнологии освоения рудных месторождений Северного Кавказа: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2002. – 360 с.
4. Reuse and mechanochemical processing of ore dressing tailings used for extracting Pb and Zn / V.I. Golik, R.V. Klyuev, N.V. Martyushev, V.V. Kondratiev, V.S. Tynchenko, V.A. Gladkikh, L.V. Iushkova, V. Brigida // Materials. – 2023. – № 16. – 7004.
5. Сыса А.А. Теоретические основы комбинированной технологии активации руд: дисс. ... канд. техн. наук. – Владикавказ, 2001. – 130 с.
6. Harris J.M., Roach B. Environmental and natural resource economics. A contemporary approach. – New York, Armonk: M.E. Sharpe, Inc., 2013. – 246 p.

7. Лузин Б.С., Битимбаев М.Ж. Новая технология электрохимического извлечения золота из упорных сульфидных руд и концентратов // Международная конференция по вопросам комплексной переработки минерального сырья. – Алматы, 2003. – С. 24–26.
8. Лузин Б.С. Методика расчета параметров формирования штабелей кучного выщелачивания // Вестник КазНТУ им. К.И. Сатпаева. – 2003. – № 3. – С. 12–17.
9. 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.
10. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining / V.S. Brigida, V.I. Golik, R.V. Klyuev, L.B. Sabirova, A.R. Mambetalieva, Yu.I. Karlina // Metallurgist. – 2023. – Vol. 67. – № 3–4. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.
11. Теория и практика совершенствования и создания новой технологии разработки и использования рудных и угольных месторождений / В.А. Шестаков, В.Н. Шаляпин, А.А. Белодедов, А.В. Логачев. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2005. – 425 с.
12. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике / М.Н. Игнатьева, В.В. Юрак, А.В. Душин, В.Е. Стровский // Горные науки и технологии. – 2021. – № 2. – С. 73–89.
13. 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) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S23. – С. 134–139.
14. 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. – Vol. 36. – № 2. – P. 114–122.
15. Уральский горный и московский горный: взаимодействие вузов / А.В. Душин, Н.Г. Валиев, Ю.А. Лагунова, А.Г. Шорин // Горный журнал. – 2018. – № 4. – С. 4–10.
16. 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. – Iss. 5. – P. 1385–1399.
17. Lagneau V., Regnault O., Descostes M. Industrial deployment of reactive transport simulation: an application to uranium in situ recovery // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2019. – Vol. 85. – Iss. 1. – P. 499–528.
18. Uncertainty quantification for uranium production in mining exploitation by In Situ Recovery / J. Langanay, T. Romary, I. Freulon et al. // Computational Geosciences. – 2021. – Vol. 25. – № 3. – P. 831–850. DOI: 10.1007/s10596-020-10018-x
19. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: challenges and future prospects // Hydrometallurgy. – 2015. – Vol. 157. – P. 306–324.
20. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // Waste Management. – 2017. – Vol. 61. – P. 40–57.

Информация об авторах

Владимир Иванович Голик, доктор технических наук, профессор, кафедра металлургии, Московский политехнический университет, Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38, v.i.golik@mail.ru.
<https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

Поступила в редакцию: 21.03.2024

Поступила после рецензирования: 10.07.2024

Принята к публикации: 24.01.2025

REFERENCES

1. Beisembaev B.B., Kenzhaliev B.K., Absalyamov H.K., Lerman B.D., Luzin B.S., Doronin A.P. *Theory and practice of heap leaching of gold*. Almaty, Gylm Publ., 1998. 168 p. (In Russ.)
2. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. technology of waste-free disposal of tailings of the Mizur mining and processing plant. *Metallurg.*, 2023, vol. 66, no. 11–12, pp. 1476–1480. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-Y.
3. Kozyrev E.N. *Scientific foundations of physico-chemical geotechnology for the development of ore deposits in the North Caucasus*. Dr. Diss. Moscow, 2002. 360 p. (In Russ.)
4. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Kondratiev V.V., Tynchenko V.S., Gladkikh V.A., Iushkova L.V., Brigida V.V. Reuse and mechanochemical processing of ore dressing tailings used for Pb and Zn extraction. *Materials*, 2023, no. 16, pp. 7004.
5. Sysa A.A. *Theoretical foundations of combined ore activation technology*. Cand. Diss. Vladikavkaz, 2001. 130 p. (In Russ.)
6. Harris J.M., Roach B. *Economics of the environment and natural resources. A modern approach*. New York, Armonk, M.E. Sharp, Inc., 2013. 246 p.
7. Luzin B.S., Bitimbayev M.Zh. New technology of electrochemical extraction of gold from resistant sulfide ores and concentrates. *International Conference on integrated processing of mineral raw materials*. Almaty, 2003. pp. 24–26. (In Russ.)
8. Luzin B.S. Method of calculation of parameters of formation of piles of heap leaching. *Bulletin of KazNTU named after K.I. Satpayev*, 2003, no. 3, pp. 12–17. (In Russ.)
9. 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.
10. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*, 2023, vol. 67, no. 3–4. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.
11. Shestakov V.A., Shalyapin V.N., Belodedov A.A., Logachev A.V. *Theory and practice of improving and creating a new technology for the development and use of ore and coal deposits*. Novocherkassk, YURGTU (NPI) Publ., 2005. 425 p. (In Russ.)

12. Ignatieva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Strovsky V.E. Technogenic mineral formations: problems of transition to a circular economy. *Mining sciences and technologies*, 2021, no. 2, pp. 73–89. (In Russ.)
13. Valiev N.G., Golovyryin S.S., Makarov V.V. On the use of artificial intelligence systems in audit procedures of modern mining production (problems of solving problems of modern mining production using multi-agent systems). *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, no. S 23, pp. 134–139. (In Russ.)
14. Franks D.M., Boger D.V., Côte C.M., Mulligan D.R. principles of sustainable development of waste disposal of mining and processing of minerals. *Resource policy*, 2011, vol. 36, no. 2, pp. 114–122.
15. Dushin A.V., Valiev N.G., Lagunova Yu.A., Shorin A.G. Ural Mining and Moscow Mining: interaction of universities. *Gorny journal*, 2018, no. 4, pp. 4–10. (In Russ.)
16. Sanchez F., Hartlib P. Innovations in the mining industry: technological trends and case studies of problems of breakthrough innovations. *Mining, metallurgy and geological exploration*, 2020, vol. 37, Iss. 5, pp. 1385–1399.
17. Lagno V., Regno O., Descost M. Industrial implementation of reactive transport modeling: an application to Uranium extraction in situ. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2019, vol. 85, Iss. 1, pp. 499–528.
18. Langaney J., Romari T., I. Freylon. Quantitative assessment of the uncertainty of uranium extraction during mining by the in situ Recovery method. *Computational Geosciences*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 831–850.
19. Sinclair L., Thompson J. Intraplastic copper leaching: problems and prospects of the future. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 157, pp. 306–324.
20. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: informing material recovery and fuel production. *Waste Management*, 2017, vol. 61, pp. 40–57.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., Professor, Moscow State Polytechnic University, 38, B. Semenovskaya street, Moscow, 107023, Russian Federation, v.i.golik@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

Received: 21.03.2024

Revised: 10.07.2024

Accepted: 24.01.2025