

# Алгоритм извлечения металлов из растворов природного выщелачивания потерянных руд

В.И. Голик<sup>1</sup> ✉, А.В. Титова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ vi.golik@mail.ru

**Резюме:** Статья посвящена решению проблемы извлечения металлов из растворов природного выщелачивания некондиционных руд и хвостов их обогащения с получением эколого-экономического эффекта, актуальность которой неуклонно увеличивается. Методика исследования проб включает в себя методы полярографии, спектрометрии, хроматографии, титрования и комплексометрии и др. Сульфатно-хлоридные воды исследованы с использованием промышленных электродиализаторов с циркуляцией раствора через рассольные камеры и без нее с извлечением металлов сорбентами. Детализирована схема электромембранной технологии комбинированного извлечения металлов с регламентацией процессов. Уточнена концепция природного выщелачивания потерянных в выработанном пространстве руд рудничными стоками. Предложен алгоритм очистки рудничных стоков с получением группы металлов, в том числе редкоземельных, отличающийся совмещением функций осаждения металлов и очистки шахтных стоков. Совокупная модель объединяет технологический, экологический и экономический аспекты разработки в рамках природно-техногенной системы. Сделан вывод о целесообразности реализации рекомендаций исследования для решения экологической проблемы и упрочнения сырьевой базы путем снижения потерь ценных компонентов. Реализация рекомендаций статьи способствует решению основных задач горного производства: повышение полноты использования недр и снижение нагрузки на окружающую среду при обеспечении безопасности работ.

**Ключевые слова:** добыча металлов, естественное выщелачивание, руда, хвосты обогащения, электромембранные технологии

**Для цитирования:** Голик В.И., Титова А.В. Алгоритм извлечения металлов из растворов природного выщелачивания потерянных руд. Горная промышленность. 2024;(6):116–119. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-116-119>

## An algorithm for extracting metals from natural leaching solutions of lost ores

V.I. Golik<sup>1</sup> ✉, A.V. Titova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ vi.golik@mail.ru

**Abstract:** The article discusses a solution to the problem of extracting metals from natural leaching solutions of the off-grade ores and their mill tailings to obtain ecological and economic efficiency, the relevance of which is steadily increasing. The methodology of studying the samples includes the methods of polarographic analysis, spectrometry, chromatography, titration and complexometry, etc. Sulfate-chloride waters were studied using industrial electrodiализаторы with the solution circulation through brine chambers and without it with metal extraction by sorbents. Details are provided of the scheme of the electromembrane technology of combined metal extraction with the process regulation. The concept of natural leaching of the ores lost in the worked-out space by mine effluents has been clarified. An algorithm is proposed to purify the ore effluents with the production of a group of metals, including the rare earth metals, which combines the functions of metal deposition and purification of the mine effluents. The aggregate model combines the technological, environmental and economic aspects of mining within the framework of the natural and man-made systems. A conclusion is made that it is advisable to implement the recommendations of the study to solve the environmental problem and strengthen the raw material base by reducing the loss of valuable components. Implementation of the recommendations provided in the article contributes to the solution of the main tasks of mining, i.e. increasing a complete utilization of the subsoil resources and reducing the burden on the environment while ensuring the safety of operations.

**Keywords:** metal mining, natural leaching, ore, mill tailings, electromembrane technologies

**For citation:** Golik V.I., Titova A.V. An algorithm for extracting metals from natural leaching solutions of lost ores. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):116–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-116-119>

### Введение

Растущие потребности человечества стимулируют исследования новых путей добычи металлов ресурсосберегающими технологиями, которые нередко оказываются одновременно и природо-сберегающими.

Перспективы увеличения минеральной базы цветной металлургии связаны с развитием природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд [1–3]. Одним из таких направлений является извлечение металлов из растворов природного выщелачивания, потерянных при выемке запасов из недр и обогащении руд. На горных предприятиях освоено извлечение металлов из хвостов обогащения комбинированными методами активации [4] и осаждение металлов в процессе очистки сточных вод с использованием природных продуктов [5; 6].

Оценка воздействия отвалов рудников на окружающую среду при проектировании технологий разработки коренных и техногенных месторождений производится с позиций применения технологии выщелачивания некондиционного сырья [7–9]. Отдельные аспекты проблемы рассмотрены зарубежными исследователями [10–12].

Цель эксперимента – исследование параметров извлечения металлов из растворов природного выщелачивания некондиционных руд.

### Методика

Сульфатно-хлоридные с преобладанием катионов натрия воды Архонского месторождения исследованы в электродиализаторе с моделированием режима подачи природных растворов. На основе анализа данных о расходе электроэнергии на извлечение металлов из растворов природного выщелачивания руд разрабатывается алгоритм процесса и рекомендуется оборудование для его реализации.

### Результаты

При плотности тока 100 А/м<sup>2</sup> и практически одинаковых условиях эксперимента в варианте с циркуляцией растворов концентрация солей в дилуате оказалась большей (табл. 1). В варианте без циркуляции содержание рассола характеризуется в табл. 2.

Показатели экспериментального моделирования подтверждают возможность повышения глубины извлечения металлов. После обессоливания маточных рассолов в электродиализаторах концентрация цинка уменьшилась.

На основании полученных результатов процессы извлечения металлов из растворов сводятся к следующим:

- осаждение солей и металлов путем создания гидросреды с рН 9...10;
- нейтрализация щелочного слива после отделения магния и кальция;
- кучное выщелачивание шахтными стоками после укрепления анолитом;
- обессоливание растворов в электродиализаторах.

Электрохимическая обработка производится в электролизерах. Анодное и катодное пространство разделяется мембраной. При плотности тока 300...500 А/м<sup>2</sup> производительность процесса достигает 1 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> мембраны. Расход электро-

Таблица 1  
Концентрация в рассоле с циркуляцией

Компоненты	Шахтные воды		Дилуат	
	мг/дм <sup>3</sup>	Вариация	мг/дм <sup>3</sup>	Вариация
Na	440	17	73	8
Ca	210	7	34	11
Mg	75	18	12	23
Cl	905	5	115	18
SO <sub>4</sub>	585	22	105	12
Zn	45	13	0,3	6
Pb	2,5	4	0,2	18

Table 1  
Concentration in brine with circulation

Таблица 2  
Концентрация в рассоле без циркуляции

Компоненты	Шахтные воды		Дилуат	
	мг/дм <sup>3</sup>	Вариация	мг/дм <sup>3</sup>	Вариация
Na	445	16	92	14
Ca	205	6	41	18
Mg	72	18	9	10
Cl	900	6	107	6
SO <sub>4</sub>	590	22	94	5
Zn	40	13	0,4	12
Pb	2,4	4	0,07	25

Table 2  
Concentration in brine without circulation

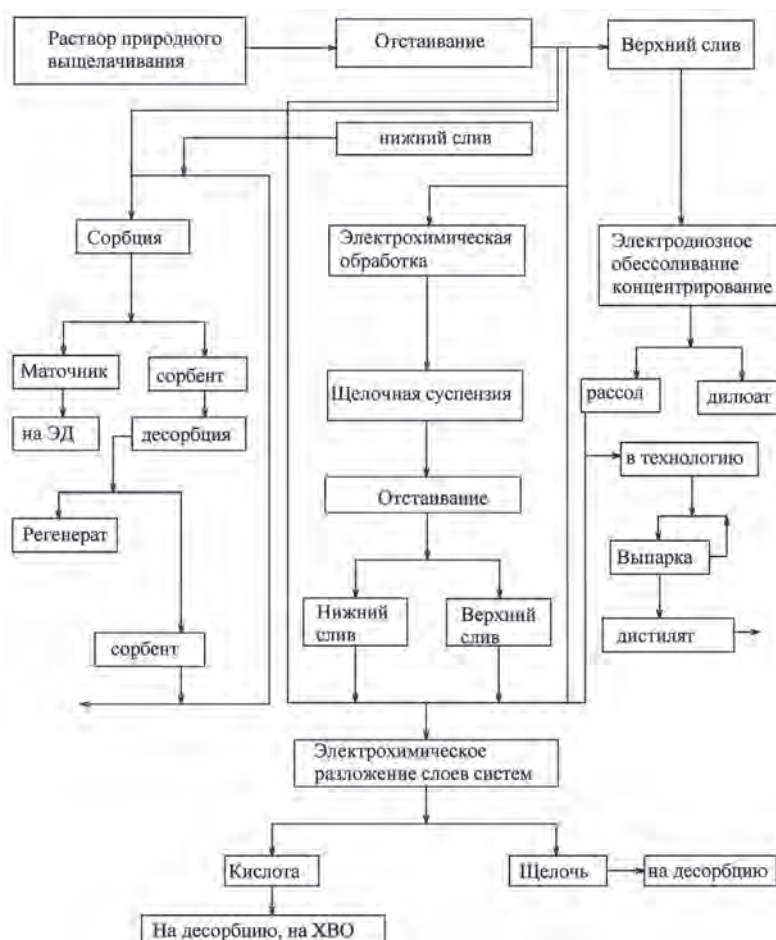
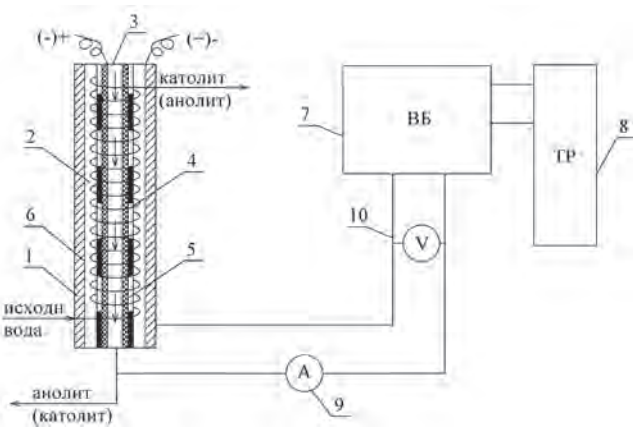


Рис. 1  
Алгоритм очистки растворов природного выщелачивания

Fig. 1  
An algorithm for treating natural leaching solutions



**Рис. 2**  
Установка для электрохимической очистки стоков:  
1 – стоки;  
2 – анодная камера;  
3 – катодная камера;  
4 – анод;  
5 – диафрагма;  
6 – катод;  
7 – выпрямитель;  
8 – трансформатор;  
9 – амперметр;  
10 – вольтметр

**Fig. 2**  
A unit for electrochemical wastewater treatment:  
1 - wastewater;  
2 - anode chamber;  
3 - cathode chamber;  
4 - anode;  
5 - diaphragm;  
6 - cathode;  
7 - rectifier;  
8 - transformer;  
9 - amperemeter;  
10 - voltmeter

нергии уменьшается применением в качестве анода платинированного титана.

В результате обработки достигается полная очистка шахтных стоков.

Электрохимическое разложение солевых систем в электролизерах производит щелочи и кислоты, которые могут быть товарным продуктом.

Процессы выщелачивания потерянных руд стоками Садонского месторождения подчиняются закономерностям. Стоки промышленных предприятий относятся к классу слабо солоноватых (1–3 г/дм<sup>3</sup>), соленых (3–5 г/дм<sup>3</sup>), сильно солоноватых (5–10 г/дм<sup>3</sup>). С участием воздуха и воды в выработанном пространстве они разрушают руды за счет разложения сульфидов.

Мизурская обогатительная фабрика работает по прямой схеме, при которой хвосты, сливы и фильтраты направляются в хвостохранилища и далее в р. Ардон. Это приводит к потерям ценных компонентов и к загрязнению экосистем окружающей среды.

Алгоритм очистки рудничных стоков представлен на рис. 1. В качестве реальной формы нейтрализации рекомендуется полная переработка стоков (рис. 2).

Реализация рекомендаций статьи способствует решению основных задач горного производства: повышению полноты использования недр и снижению нагрузки на окружающую среду при обеспечении безопасности работ.

**Выводы**

1. Эффективность действия возможных к применению реагентов ранжируется в ряд: серная кислота, известь, карбоксиметилцеллюлоза, полиакриламид, КФ-4.
2. Флокулянт КФ-4 по сравнению с полиакриламидом и известью повышает скорость осаждения частиц и рекомендуется для очистки стоков из хвостохранилища Мизурской обогатительной фабрики.
3. Технологические возможности позволяют понизить загрязненность стоков до уровня санитарных требований.
4. Реализация исследований частично решает экологическую проблему и повышает комплексность использования руд путем снижения потерь ценных компонентов.

**Список литературы / References**

1. Титова А.В., Голик В.И. Перспективы увеличения минеральной базы цветной металлургии. *Горная промышленность*. 2021;(1):61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-61-68>  
Titova A.V., Golik V.I. Prospects for increasing mineral resource base of non-ferrous metals industry. *Russian Mining Industry*. 2021;(1):61–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-61-68>
2. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>  
Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
3. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):405–415.  
Rybak Ya., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):405–415. (In Russ.)
4. Голик В.И. Извлечение металлов из хвостов обогащения комбинированными методами активации. *Обогащение руд*. 2010;(5):38–40. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/458/article/4129/> (дата обращения: 10.08.2024).  
Golik V.I. Metals recovery from mineral processing tailings by combined activation methods. *Obogashchenie Rud*. 2010;(5):38–40. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/458/article/4129/> (accessed: 10.08.2024).

5. Пухова В.П., Воропанова Л.А. Очистка сточных вод горно-перерабатывающих предприятий путем использования природных продуктов. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2019;11(2):134–141. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2019-11-2-134-141>  
Pukhova V.P., Voropanova L.A. Wastewater treatment of mining and processing plants using the natural products. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2019;11(2):134–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2019-11-2-134-141>
6. Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., Golev A. Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*. 2019;9(5):286. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
7. Васильев П.В., Рыбак В.Л., Егорова Т.А. Методика оценки воздействий породных отвалов шахт на окружающую среду и мероприятия по их локализации. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016;(2):3–18.  
Vasiliev P.V., Ribak V.L., Egorova T.A. Method of evaluating influence upon environment of mines waste dumps and measures by their localization. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2016;(2):3–18. (In Russ.)
8. Крупская Л.Т., Голубев Д.А., Волобуева Н.Г. Оценка экологической ситуации территории в зоне влияния хвостохранилища с токсичными отходами. *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2016;(1-2):97–100.  
Krupskaya L.T., Golubev D.A., Volobueva N.G. Assessment of the ecological situation of the territory in the zone of influence of a tailings dump with toxic waste. *Sovremennye Tendentsii Razvitiya Nauki i Tekhnologii*. 2016;(1-2):97–100. (In Russ.)
9. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетров З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2016;8(1):46–51. (In Russ.)  
Khulelidze K.K., Kondratev Yu.I., Zaalishvili V.B., Betrov Z.S. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016;8(1):46–51. (In Russ.)
10. Lööw J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the impact of new technology from a work place perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019;36(4):701–707. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00104-9>
11. Xu M., Soliman M.G., Sun X., Pelaz B., Feliu N., Parak W.J., Liu S. How entanglement of different physicochemical properties complicates the prediction of in vitro and in vivo interactions of gold nanoparticles. *ACS Nano*. 2018;12(10):10104–10113. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b04906>
12. Li G., Zhou K., Zhu Z., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite. *Journal of Cleaner Production*. 2018;189:620–626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.083>

**Информация об авторах**

**Голик Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: [vi.golik@mail.ru](mailto:vi.golik@mail.ru)

**Титова Ася Владимировна** – доктор технических наук, заместитель директора по развитию, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [vikt\\_s@mail.ru](mailto:vikt_s@mail.ru)

**Information about the authors**

**Vladimir I. Golik** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metallurgy of Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: [vi.golik@mail.ru](mailto:vi.golik@mail.ru)

**Asya V. Titova** – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Development, V.I. Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: [vikt\\_s@mail.ru](mailto:vikt_s@mail.ru)

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 30.10.2024

Поступила после рецензирования: 26.11.2024

Принята к публикации: 02.12.2024

**Article info**

Received: 30.10.2024

Revised: 26.11.2024

Accepted: 02.12.2024