

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В.И. Голик<sup>1,2</sup>, В.В. Кондратьев<sup>3</sup>, В.В. Романова<sup>4</sup>, В.Ю. Конюхов<sup>5</sup>, Т.А. Опарина<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Московский политехнический университет,  
Москва, Россия, e-mail: v.i.golik@mail.ru

<sup>2</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Владикавказ, Россия

<sup>3</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН,  
Иркутск, Россия

<sup>4</sup> Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

<sup>5</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Иркутск, Россия

**Аннотация:** Устойчивый рост потребления минерального сырья, истощение доступных для добычи ресурсов и изменение географии освоения рудных месторождений увеличивают актуальность проблем совершенствования технологий добычи металлов, в том числе, новыми методами. Цель исследований этого направления состоит в определении и обосновании перспективных инновационных технологий, в том числе, выщелачивания металлов из хвостов первичной переработки, для обеспечения устойчивой работы предприятий горной отрасли промышленности. Исследована эффективность освоения речных буровых установок, ускоряющих решение проблем подземного скважинного и блокового выщелачивания руд, а также накопленных в отвалах неактивных отходов. Доказано, что производительность бурения скважин различного назначения, определяющая скорость вскрытия и освоения рудных запасов, при определенных условиях может быть увеличена. В рамках второго направления раскрыт механизм извлечения металлов и показан эффект механоактивации минеральных отходов добычи и переработки при переводе их в категорию техногенных месторождений. Установлено, что степень извлечения свинца нелинейно возрастает по полиномиальному закону с увеличением массовых долей реагентов при высокой частоте вращения роторов. Выявленные особенности и закономерности применимы для обоснования параметров устойчивых геотехнологий комплексного освоения месторождений полиметаллического сырья. Результаты исследований могут быть востребованы при модернизации действующих и проектируемых предприятий горного и обогащательного профиля, а также для подготовки кадров высшей квалификации.

**Ключевые слова:** технологии, исследование, инновации, выщелачивание металлов, хвосты переработки, буровая установка, скважины, рудные месторождения, хвосты переработки.

**Для цитирования:** Голик В. И., Кондратьев В. В., Романова В. В., Конюхов В. Ю., Опарина Т. А. Совершенствование технологии выщелачивания металлов при разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 5–14. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_71\_0\_5.

---

## Improving technologies for metals leaching during ore deposit development

V.I. Golik<sup>1,2</sup>, V.V. Kondratyev<sup>3</sup>, V.V. Romanova<sup>4</sup>, V.Yu. Konyukhov<sup>5</sup>, T.A. Oparina<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Moscow Technical University (MSTU), Moscow, Russia, e-mail: v.i.golik@mail.ru

<sup>2</sup> Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia

<sup>3</sup> A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>4</sup> Transbaikal State University, Chita, Russia

<sup>5</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

---

**Abstract:** The steady growth in the consumption of mineral raw materials, the depletion of resources available for mining and the change in the geography of the development of ore deposits increase the urgency of the problems of improving metal mining technologies, including new methods. The purpose of research in this area is to identify and substantiate promising innovative technologies, including the leaching of metals from the tailings of primary processing to ensure the sustainable operation of mining enterprises. The development of new natural and resource-saving technologies has been studied to a lesser extent compared with other areas of mining production. The efficiency of the development of rack-and-pinion drilling rigs has been studied, accelerating the solution of problems of underground deep and block leaching of ores, as well as inactive waste accumulated in dumps. It is proved that the productivity of drilling wells for various purposes, which determines the speed of opening and development of ore reserves, can be increased under certain conditions. Within the frame-work of the second direction, the mechanism of metal extraction is disclosed and the effect of mechanical activation of mineral waste from extraction and processing when transferring them to the category of technological deposits is shown. It is established that the degree of lead extraction increases non-linearly according to the polynomial law with an increase in the mass fractions of reagents at a high frequency of rotation of the rotors. The revealed features and patterns are applicable to substantiate the parameters of sustainable geotechnologies for the integrated development of polymetallic deposits. The research results may be in demand during the modernization of existing and planned mining and processing enterprises, as well as for the training of highly qualified personnel.

**Key words:** technologies, research, innovations, metal leaching, processing tailings, drilling rig, wells, ore deposits, processing tailings.

**For citation:** Golik V. I., Kondratyev V. V., Romanova V. V., Konyukhov V. Yu., Oparina T. A. Improving technologies for metals leaching during ore deposit development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):5-14. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_71\_0\_5.

---

### Введение

Рост мировой экономики и запросы промышленности актуализируют проблеме нехватки минерального сырья, компенсацию негативных последствий

добычи и необходимость отработки бедных и вкрапленных руд [1 – 4]. Высокие объемы отходов первичной отработки богатых руд обостряют вопросы использования покрытых отвальными массами

земель, снижения качества водных ресурсов и др. [5, 6]. В свете этого особенно важной становится необходимость соответствия геотехнологий целям устойчивого развития [7] и противодействия ограничительным мероприятиям и в глобальном аспекте, и на уровне отдельных стран [8]. Недостаточная эффективность мер по экологизации деятельности горных предприятий в направлении обеспечения устойчивости добычи приводит к постепенному смещению акцентов с «жизненного цикла шахты на жизненный цикл добываемого материала» [9]. Эти негативные тенденции при отсутствии предпосылок к трансформации отечественного добывающего комплекса в рамках циркуляционной экономики обостряют поиск направлений экологизации технологических процессов.

Исследования проблем обеспечения промышленности минеральным сырьем направлены на минимизацию негативных последствий отработки запасов [10] или переработки полученного сырья [11]. В усложняющихся горнотехнических условиях разработки месторождений подходы к обеспечению устойчивой добычи нуждаются в совершенствовании [5, 12].

В горнорудной промышленности развивается направление экологизации подземного и кучного выщелачивания руд. Наиболее ярким примером подземного выщелачивания является скважинная добыча урана.

Актуальны исследования, направленные на уменьшение образования массы загрязнителей при воздействии химических реагентов на вмещающие породы [13]. Так, при сохранении равных условий извлечения (содержание в продуктивных растворах — ПР) количество добываемого урана можно увеличить с 29 до 146 мг/л.

Ареал влияния физико-химического действия на вмещающий рудное тело

массив пропорционален мощности пласта. Внедрение технологии, которая заменяет выработку пласта скважинным методом добычи, повышает эффективность технологий подземного выщелачивания [14, 15]. Однако методика использования речечных буровых станков для повышения эффективности подземного выщелачивания изучена недостаточно.

Одним из направлений циркуляционной экономики является рециклинг, или достижение безотходности горнорудного производства, что требует использования техногенных отходов (хвостов обогащения) в виде инертных компонентов закладочных смесей [16, 17]. Селективность обработки хвостов с применением новых электро- и фотохимических методов позволяет увеличить выход металлов в рамках технологии кучного выщелачивания [18].

Использование механоактивации горной массы при ее продолжительной обработке в шаровой мельнице показывает, что с ростом числа оборотов ротора дезинтегратора эффективность выщелачивания растет, но максимальный эффект прослеживается в первые 9 ч обработки [19]. Обогащение латерита в подобных мельницах (при высоких оборотах ротора мельницы) привело к тому, что эффект (выход Fe и Ni до 80%) был достигнут в первый час проведения эксперимента [20]. В то же время феномен механохимической активации материалов при воздействии дезинтеграторов остается недостаточно изученным [21].

Цель исследования заключается в оценке перспективных направлений технологий выщелачивания металлов.

### **Использование речечных буровых станков для повышения эффективности выщелачивания металлов**

При сравнении показателей вариантов бурения скважин с использованием

Таблица 1

**Результат расчетов усилия при бурении скважины**  
**Calculation results of the required force for drilling wells**

| Усилие, кН     | L, м |      |      |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | 100  | 200  | 300  | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  |
| G              | 24,0 | 48,7 | 73,2 | 97,8  | 122,2 | 146,5 | 17,3  | 195,2 | 219,6 | 244,1 |
| F              | 30,3 | 60,3 | 90,8 | 121,1 | 151,4 | 181,9 | 212,9 | 242,3 | 272,6 | 302,8 |
| F <sub>i</sub> | 0,1  | 0,4  | 1,2  | 2,9   | 5,8   | 9,9   | 15,8  | 23,7  | 33,7  | 46,2  |
| F <sub>Σ</sub> | 30,4 | 60,7 | 92,0 | 124,0 | 157,2 | 191,8 | 228,7 | 266,0 | 306,3 | 349,0 |

канатного и реечного станков произведен расчет параметров по разработанной методике.

Сила трения между трубой и стенкой скважины, кН [22]:

$$F_r = \pi \cdot D \cdot L \cdot k_f,$$

где  $k_f$  — коэффициент трения;  $D$  — внешний диаметр трубы, м;  $L$  — длина скважины, м.

Вес трубы при длине скважины 600 м, (кН):

$$G = P_{600} \cdot k,$$

где  $k$  — коэффициент вытеснения;

$$k = 1 - (\rho_r / \rho_0),$$

$\rho_r$  — плотность раствора, кг/м<sup>3</sup>.

Трение колонны о стенки скважины при ее изгибе, кН:

$$F_s = G \cdot k_g \cdot \sin \alpha,$$

где  $k_g$  — коэффициент трения стальной трубы о стенку скважины;  $\alpha$  — угол наклона скважины, град.

Спротивление упругому изгибу [22]:

$$F_i = k_f \cdot W_{gap} \cdot \frac{4 \cdot L \cdot F^2}{3 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I},$$

где  $k_f$  — коэффициент трения;  $F$  — сумма осевых усилий без учета сопротивления изгибу, кН;  $W_{gap}$  — разница между радиусом забоя и радиусом буровой трубы, м;  $E$  — модуль Юнга, кН/м<sup>2</sup>;  $I$  — осевой момент инерции, м<sup>4</sup>.

Сумма осевых усилий без учета изгибающего момента, кН:

$$F = G + F_r + F_s.$$

Момент инерции, см<sup>4</sup>:

$$I = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}.$$

Сумма усилий при проталкивании трубы длиной  $L$  (табл. 1):

$$F_{\Sigma} = F + F_i.$$

При бурении скважины с углом 45° усилие бурения составит 19,6 т.

А при бурении скважины станком канатного типа на той же глубине 600 м усилие составит  $17,33 \times 0,2 \times 0,3827 = 1,4$  т.

Определено, что канатным станком бурить наклонные скважины можно только с использованием утяжеленных труб. При этом скорость бурения скважины зависит от нагрузки на долото [23, 24].

При глубине бурения скважины скорость бурения увеличивается пропорционально нагрузке на долото. Исходя из этого, большую скорость бурения и эффективность дает та технология, при которой нагрузка на долото выше.

Коэффициент продуктивности бурения [15]:

$$K_p = \frac{\bar{W}_r}{\bar{W}_k},$$

где  $\bar{W}_r$  — осевая нагрузка при бурении реечным станком;  $\bar{W}_k$  — осевая нагрузка при бурении канатным станком.

Таблица 2

**Параметры выщелачивания**  
**Parameters of leaching**

| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>в растворе, г/л | NaCl<br>в растворе, г/л | Ж/Т | Масса раствора, г | Масса пульпы, г | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>в пульпе, % | NaCl<br>в пульпе, % | Извлечение свинца, %, варианты |       |       |
|---|-------------------------|-----|-------------------|-----------------|---|---------------------|--------------------------------|-------|-------|
|   |                         |     |                   |                 |   |                     | I                              | II    | III   |
| 2   | 20                      | 4   | 200               | 255             | 0,15  | 1,60                | 17,10                          | 0,37  | 0,75  |
| 10  | 20                      | 4   | 200               | 250             | 0,80  | 1,59                | 1,46                           | 0,94  | 1,48  |
| 2   | 160                     | 4   | 200               | 250             | 0,14  | 11,81               | 24,72                          | 27,14 | 27,19 |
| 10  | 160                     | 4   | 200               | 250             | 0,73  | 11,83               | 37,11                          | 40,52 | 40,13 |
| 2   | 20                      | 10  | 500               | 550             | 0,18  | 1,85                | 3,64                           | 4,88  | 5,96  |
| 10  | 20                      | 10  | 500               | 550             | 0,89  | 1,83                | 1,76                           | 1,83  | 1,64  |
| 2   | 160                     | 10  | 500               | 550             | 0,17  | 13,47               | 46,47                          | 40,43 | 44,25 |
| 10  | 160                     | 10  | 500               | 550             | 0,84  | 13,45               | 44,15                          | 35,75 | 18,42 |
| 6   | 90                      | 7   | 350               | 400             | 0,50  | 7,50                | 40,82                          | 38,38 | 40,87 |

**Эффективность механоактивации процессов извлечения металлов в дезинтеграторе**

В варианте I свинец извлекали традиционным агитационным выщелачиванием, а в вариантах II и III выщелачивали в дезинтеграторе с частотой вращения ротора, соответственно, 50 и 200 мин<sup>-1</sup>.

Соотношение фракций твердое/жидкое изменяли в пределах 1/4... 1/10.

Результаты исследования влияния дезинтегратора DESI-11 на эффективность агитационного выщелачивания свинца из хвостов Мизурской обогатительной фабрики сведены в табл. 2.

В результате исследования с использованием метода LOESS [25, 26] установлена полиномиальная зависимость извлечения свинца от параметров раствора для агитационного выщелачивания ( $R^2 = 0,85$ ):

$$Pb = -11,56 - 191,28H_2SO_4 - 0,68HCl + 368,63H_2SO_4^2 + 0,29HCl^2 + \\ + 33,23H_2SO_4HCl - \dots - 178,68H_2SO_4^3 - 0,88H_2SO_4HCl^2 - 24,27H_2SO_4^2HCl,$$

где Pb – выход свинца, %; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – массовая доля серной кислоты, %; NaCl – массовая доля хлорида натрия, %.

В процессе агитационного выщелачивания при 0,1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> увеличение доли NaCl с 8 до 14% повышает извлечение свинца с 3,8 до 33,8%. При доле H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> менее 1% извлечение свинца растет, достигая 26% при доле NaCl ≥ 2,2%.

Если доля NaCl составляет 14%, то увеличение доли H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в пределах 0,1... 1% увеличивает извлечение свинца с 34 до 42%. При доле H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > 0,75 содержание свинца снижается с 42 до 10%.

Эффективность механоактивации процесса выщелачивания в дезинтеграторе при частоте вращения ротора 50 Гц и  $R^2 = 0,98$  описывается следующей моделью:

$$Pb = -27,88 + 206,44H_2SO_4 + 3,71HCl - 376,53H_2SO_4^2 - 0,45HCl^2 + \\ + 10,52H_2SO_4HCl + \dots + 168,90H_2SO_4^3 + 0,03HCl^3 - 0,58H_2SO_4HCl^2 - 0,75H_2SO_4^2HCl.$$

При частоте вращения ротора 200 Гц модель принимает следующий вид ( $R^2 = 0,96$ ):

$$\text{Pb} = -1,79 + 125,98\text{H}_2\text{SO}_4 - 5,30\text{HCl} - 271,59\text{H}_2\text{SO}_4^2 + 0,32\text{HCl}^2 + \\ + 29,06\text{H}_2\text{SO}_4\text{HCl} - \dots - 112,75\text{H}_2\text{SO}_4^3 - 1,33\text{H}_2\text{SO}_4\text{HCl}^2 - 9,62\text{H}_2\text{SO}_4^2\text{HCl}.$$

Использование дезинтегратора с частотой вращения ротора 50 Гц увеличивает эффективность выщелачивания. Так, при  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0,1\%$  извлечение свинца увеличивается в диапазоне 3,8... 30%. Если доля  $\text{H}_2\text{SO}_4$  увеличивается до 1% при доле  $\text{NaCl} \geq 2,6\%$ , извлечение свинца возрастает до 34%.

Наличие в растворе 14%  $\text{NaCl}$  и 0,1... 1%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  увеличивает извлечение цинка в пределах 30... 42%.

Увеличение  $\text{NaCl}$  до 0,5... 14% при 0,1%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  повышает выход свинца до 30%. При доле  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1%, увеличение доли  $\text{NaCl}$  на величину более 3% повышает выход свинца с 3,8 до 26%.

Увеличение доли  $\text{H}_2\text{SO}_4$  до 1% при минимальном значении  $\text{NaCl}$  повышает выход свинца в диапазоне 7,6... 14,7%. Наличие в растворе более 14%  $\text{NaCl}$  и увеличение доли  $\text{H}_2\text{SO}_4$  с 0,1 до 1% повышает выход свинца в пределах 30... 42%, а при доле  $\text{H}_2\text{SO}_4 \geq 0,7\%$  он снижается до 10%.

### **Заключение**

Природо- и ресурсосберегающие технологии разработки рудных месторождений обеспечивают минимизацию негативных последствий добычи и обогащения геоматериалов, стимулирование альтернативных источников энергоресурсов, утилизацию отходов с целью улучшения состояния окружающей природной среды.

Бурение скважин речными станками ускоряет подготовку запасов к выемке.

Механохимическая активации металлосодержащего сырья в дезинтеграторе эффективнее агитационного выщелачивания.

Полученные результаты и подходы к решению подобных задач могут быть использованы при обосновании устойчивых геотехнологий комплексной отработки залежей полиметаллического сырья, сосредоточенного в пределах трансконтинентальных поясов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Krausmann F., Gingrich S., Eisenmenger N., Erb K. H., Haberl H., Fischer-Kowalski M. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century // *Ecological Economics*. 2009, vol. 68, no. 10, pp. 2696 – 2705. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.05.007.

2. Gendler S. G., Rudakov M. L., Falova E. S. Analysis of the risk structure of injuries and occupational diseases in the mining industry of the Far North of the Russian Federation // *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*. 2020, no. 3, pp. 81 – 85. DOI: 10.33271/nvngu/2020-3/081.

3. Рубинштейн Дж. Б., Суонсон А., Холушко М. Э., Шаоцян З., Зияджа Д., Анастассакис Г., Боканьи Л., Сачдев Р. К., Бектурганов Н. С., Айбулдинов Э. К., Бляшке В., Байч И., Де Кортс Г. Дж., Озбайоглу Г., Лаурила М., Дженкинсон Д., Воробьев С. А. Обогащение угля в мире – современное состояние и мировые тенденции: обзор // *Горный журнал*. – 2016. – № 6. – С. 4 – 55. DOI: 10.17580/gzh.2016.06.01.

4. Гульбин Ю. Л., Акбарпуран Хайяти С. А., Сироткин А. Н. Минеральный состав и термометрия метаморфических пород Западного Нью-Фрисланда, Шпицберген // *Записки Горного института*. – 2023. – Т. 263. – С. 657 – 673.



5. Ilyushin Y. V., Pervukhin D. A., Afanaseva O. V. Application of the theory of systems with distributed parameters for mineral complex facilities management // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019, vol. 14, no. 22, pp. 3852 – 3864.

6. Куликова А. А., Овчинникова Т. И. Региональный критерий отнесения горно-промышленных регионов к территориям с наибольшей подверженностью геоэкологическим изменениям // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 27–34. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.

7. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16.

8. Ilyushin Y. V., Kivayev I. N., Novozhilov I. M. Classification of modern educational programs by functional purpose / *Proceedings of 2017 IEEE 6th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations)*, SPUE 2017. 2017, pp. 96–99. DOI: 10.1109/IVForum.2017.8246061.

9. Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V. Circular mining wastes management for sustainable production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze // *Sustainability*. 2023, vol. 15, article 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

10. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 205–216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

11. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev 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, vol. 16, article 7004. DOI: 10.3390/ma16217004.

12. Воробьев С. А., Воробьев А. А. К проблеме формирования основных ценностей будущего механики горных пород (взгляд издателя) // *Горный журнал*. – 2020. – № 1. – С. 7–11. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.01.

13. Rakishev B. R., Bondarenko V. I., Matayev M. M., Kenzhetayev Z. S. Influence of chemical reagent complex on intensification of uranium well extraction // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019, no. 6, pp. 25–30. DOI: 10.29202/hvngu/20196/4.

14. Комащенко В. И., Атрушкевич В. А., Качурин Н. М., Стась Г. В. Эффективность скважинных зарядов при разрушении горных пород взрывом // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2019. – Т. 11. – № 2. – С. 191–198. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-2-191-198.

15. Анищенко В. И., Атрушкевич В. А. Влияние конструкции буровой установки на эффективность бурения скважин // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2020. – Т. 12. – № 3. – С. 383–393. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-383-393.

16. Хайрутдинов М. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Тюляева Ю. С., Хайрутдинов А. М. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 30–36. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.

17. Yushina T. I., Krylov I. O., Valavin V. S., Toan V. V. Old iron-bearing waste treatment technology // *Eurasian Mining*. 2018, no. 1, pp. 16–21. DOI: 10.17580/em.2018.01.04.

18. Rasskazova A. V., Sekisov A. G., Kirilchukirilchu M. S., Vasyanovvasyanov Y. A. Stage-activation leaching of oxidized copper–gold ore: Theory and technology // *Eurasian Mining*. 2020, no. 1, pp. 52–55. DOI: 10.17580/em.2020.01.10.

19. Minagawa M., Hisatomi S., Kato T., Granata G., Tokoro C. Enhancement of copper dissolution by mechanochemical activation of copper ores: Correlation between leaching experiments and DEM simulations // *Advanced Powder Technology*. 2018, vol. 29, no. 3, pp. 471–478. DOI: 10.1016/j.apt.2017.11.031.

20. Basturkcu H., Achimovičová M., Kaňuchová M., Acarkan N. Mechanochemical pretreatment of lateritic nickel ore with sulfur followed by atmospheric leaching // *Hydrometallurgy*. 2018, vol. 181, pp. 43–52. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.08.016.

21. Голик В. И., Лукьянов В. Г., Хашева З. М. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 6–14.

22. Galle E. M., Woods H. B. Variable weight and rotary speed for lowest drilling cost. AAODC Annual Meeting. American Petroleum Institute. New Orleans, LA, USA, 1960.
23. Galle E. M., Woods A. B. Best constant weight and rotary speed for rotary rock bits / API Drilling and production practice. 1963, pp. 48 – 73.
24. Bourgoyne A. T. Jr., Millheim K. K., Chenevert E. M., Young F. S. Jr. Applied drilling engineering, society of petroleum engineers. Richardson, TX, USA, 1991, p. 226.
25. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Страданченко С. Г., Хашева З. М. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 6–14.
26. Джиоева А. К., Бригида В. С. Пространственная нелинейность динамики выделения метана в подземных скважинах для устойчивой добычи полезных ископаемых // Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 522–530. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.3. **PLAB**

## REFERENCES

1. Krausmann F., Gingrich S., Eisenmenger N., Erb K. H., Haberl H., Fischer-Kowalski M. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*. 2009, vol. 68, no. 10, pp. 2696 – 2705. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.05.007.
2. Gendler S. G., Rudakov M. L., Falova E. S. Analysis of the risk structure of injuries and occupational diseases in the mining industry of the Far North of the Russian Federation. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*. 2020, no. 3, pp. 81 – 85. DOI: 10.33271/nvngu/2020-3/081.
3. Rubinstein J. B., Swanson A., Holuszko M. E., Shaoqiang Z., Ziaja D., Anastassakis G., Bokanyi L., Sachdev R. K., Bekturganov N. S., Aibulidinov E. K., Blaschke W., Baic I., De Korte G. J., Ozbayoglu G., Laurila M., Jenkinson D., Vorobev S. A. Coal Preparation in the World – Current status and global trends. A review. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 6, pp. 4–55. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.06.01.
4. Gulbin Y. L., Akbarpuran Khaiyati S. A., Sirotkin A. N. Mineral composition and thermobarometry of metamorphic rocks of Western Ny Friesland, Svalbard. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 263, pp. 657 – 673. [In Russ].
5. Ilyushin Y. V., Pervukhin D. A., Afanaseva O. V. Application of the theory of systems with distributed parameters for mineral complex facilities management. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019, vol. 14, no. 22, pp. 3852 – 3864.
6. Kulikova A. A., Ovchinnikova T. I. A regional criterion for classifying mining regions as territories with the greatest exposure to geocological changes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 27 – 34. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.
7. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 7 – 16. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16.
8. Ilyushin Y. V., Kivayev I. N., Novozhilov I. M. Classification of modern educational programs by functional purpose. *Proceedings of 2017 IEEE 6th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), SPUE 2017*. 2017, pp. 96 – 99. DOI: 10.1109/IVForum.2017.8246061.
9. Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V. Circular mining wastes management for sustainable production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023, vol. 15, article 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
10. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geocological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205 – 216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
11. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev 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, vol. 16, article 7004. DOI: 10.3390/ma16217004.
12. Vorobev S. A., Vorobyev A. A. On the problem of contouring core values for the future of rock mechanics (Publisher's view). *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 7 – 11. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.01.



13. Rakishev B. R., Bondarenko V. I., Matayev M. M., Kenzhetayev Z. S. Influence of chemical reagent complex on intensification of uranium well extraction. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019, no. 6, pp. 25 – 30. DOI: 10.29202/nvngu/20196/4.
14. Komashchenko V. I., Atrushkevich V. A., Kachurin N. M., Stas G. V. The effectiveness of borehole charges in the destruction of rocks by explosion. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2019, vol. 11, no. 2, pp. 191 – 198. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-2-191-198.
15. Anischenko V. I., Atrushkevich V. A. Influence of drilling rig design on well drilling efficiency. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, vol. 12, no. 3, pp. 383 – 393. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-383-393.
16. Khayrutdinov M. M., Kongar-Syuryun C. B., Tyulyaeva Y. S., Khayrutdinov A. M. Cementless backfill mixtures based on water-soluble manmade waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 11, pp. 30 – 36. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.
17. Yushina T. I., Krylov I. O., Valavin V. S., Toan V. V. Old iron-bearing waste treatment technology. *Eurasian Mining*. 2018, no. 1, pp. 16 – 21. DOI: 10.17580/em.2018.01.04.
18. Rasskazova A. V., Sekisov A. G., Kirilchukirilchu M. S., Vasyanovvasyanov Y. A. Stage-activation leaching of oxidized copper – gold ore: Theory and technology. *Eurasian Mining*. 2020, no. 1, pp. 52 – 55. DOI: 10.17580/em.2020.01.10.
19. Minagawa M., Hisatomi S., Kato T., Granata G., Tokoro C. Enhancement of copper dissolution by mechanochemical activation of copper ores: Correlation between leaching experiments and DEM simulations. *Advanced Powder Technology*. 2018, vol. 29, no. 3, pp. 471 – 478. DOI: 10.1016/j.appt.2017.11.031.
20. Basturkcü H., Achimovičová M., Kaňuchová M., Acarkan N. Mechanochemical pretreatment of lateritic nickel ore with sulfur followed by atmospheric leaching. *Hydrometallurgy*. 2018, vol. 181, pp. 43 – 52. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.08.016.
21. Golik V. I., Lukyanov V. G., Khasheva Z. M. Rationale for feasibility of using ore tailings for manufacturing hardening mixtures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015, vol. 326, no. 5, pp. 6 – 14. [In Russ].
22. Galle E. M., Woods H. B. *Variable weight and rotary speed for lowest drilling cost. AAODC Annual Meeting*. American Petroleum Institute. New Orleans, LA, USA, 1960.
23. Galle E. M., Woods A. B. Best constant weight and rotary speed for rotary rock bits. *API Drilling and production practice*. 1963, pp. 48 – 73.
24. Bourgoyne A. T. Jr., Millheim K. K., Chenevert E. M., Young F. S. Jr. *Applied drilling engineering, society of petroleum engineers*. Richardson, TX, USA, 1991, p. 226.
25. Golik V. I., Razorenov Y. I., Stradanchenko S. G., Khasheva Z. M. Principles and economic efficiency of ore mining technology combination. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015, vol. 326, no. 7, pp. 6 – 14. [In Russ].
26. Dzhoieva A. K., Brigida V. S. Spatial non-linearity of methane release dynamics in underground boreholes for sustainable mining. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 245, pp. 522 – 530. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.3.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голик Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, Московский технологический университет (МГТУ); главный научный сотрудник, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, e-mail: v.i.golik@mail.ru, Elibrary: 497371, Scopus Author ID: 6602135324, Researcher ID: U-9000-2019, ORCID ID: 0000-0002-1181-8452, Кондратьев Виктор Викторович – Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН, e-mail: v.kondratiev@igc.irk.ru,

*Романова Виктория Викторовна* — Забайкальский государственный университет, e-mail: romanova181@mail.ru,  
*Конюхов Владимир Юрьевич*<sup>1</sup> — e-mail: konyukhov\_vyu@mail.ru,  
*Опарина Татьяна Александровна*<sup>1</sup> — e-mail: tatianaop@ex.istu.edu,  
<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет.

**Для контактов:** Голик В.И., e-mail: v.i.golik@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.I. Golik*, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Moscow Technological University (MSTU), Moscow, Russia,  
Chief Researcher, Geophysical Institute  
of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy  
of Sciences, 362002, Vladikavkaz, Russia,  
e-mail: v.i.golik@mail.ru, Elibrary: 497371,  
Scopus Author ID: 6602135324,  
Researcher ID: U-9000-2019,  
ORCID ID: 0000-0002-1181-8452,

*V.V. Kondratyev*, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
664523, Irkutsk, Russia, e-mail: v.kondratiev@igc.irk.ru,

*V.V. Romanova*, Transbaikal State University,  
672039, Chita, Russia, e-mail: romanova181@mail.ru,

*V.Yu. Konyukhov*<sup>1</sup>, e-mail: konyukhov\_vyu@mail.ru,

*T. A. Oparina*<sup>1</sup>, e-mail: tatianaop@ex.istu.edu,

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
664074, Irkutsk, Russia.

**Corresponding author:** V.I. Golik, e-mail: v.i.golik@mail.ru.

Получена редакцией 03.04.2024; получена после рецензии 08.05.2024; принята к печати 10.06.2024.  
Received by the editors 03.04.2024; received after the review 08.05.2024; accepted for printing 10.06.2024.

