

Модель выщелачивания металлосодержащего сырья с механохимической активацией

С. А. Масленников¹, С. Г. Страданченко², В. И. Голик^{3✉}

¹ Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ФГБОУ ВО «ДГТУ»,
г. Шахты, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени Н. И. Платова»,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

³ Геофизический институт – филиал ФГБУН «Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр РАН», г. Владикавказ, Российская Федерация
✉ v.i.golik@mail.ru

Резюме. Новое направление в модернизации технологий разработки рудных месторождений связано с использованием дезинтеграторов-активаторов, которые являются инструментом защиты окружающей среды от воздействия отходов горной промышленности и увеличения базы строительной отрасли за счет перерабатываемых хвостов переработки руды. Актуальность нового направления инновационных технологий связана с использованием высокоскоростных дезинтеграторов-активаторов, принципиальное отличие которых заключается в том, что механическая активация хвостов обогащения сочетается с химическим извлечением из них металлов. Обоснована возможность управления процессами дробления руды, комбинированного извлечения металла и ускорения процессов выщелачивания. Создана новая универсальная математическая модель процессов извлечения металла при выщелачивании руды и переработке хвостов в различных режимах работы активатора. Показаны новые аспекты использования IT-технологий при извлечении металлов с механохимической активацией в горнодобывающей промышленности. Доказано, что полнота извлечения металла при разработке бедных руд и техногенных запасов может быть повышена за счет использования механохимических технологий с сочетанием физических и химических процессов переработки сырья в рамках горного производства. Представлены результаты экспериментальных исследований, обосновывающих преимущества и экономическую эффективность механохимического выщелачивания.

Ключевые слова: горнодобывающее предприятие, подземная технология, активатор-дезинтегратор, отходы, руда, металлы, механохимическая активация

Для цитирования: Масленников С.А., Страданченко С.Г., Голик В.И. Модель выщелачивания металлосодержащего сырья с механохимической активацией. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):59-64. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-59-64>.

A model of leaching of metal-containing raw materials with mechanochemical activation

S. A. Maslennikov¹, S. G. Stradanchenko², V. I. Golik^{3✉}

¹ Institute of Service and Entrepreneurship, branch of DSTU, Shakhty, Russian Federation

² South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

³ Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Vladikavkaz, Russian Federation

✉ v.i.golik@mail.ru

Abstract. A new direction in the modernization of ore deposit development technologies is associated with the use of disintegrator activators, which is a tool for protecting the environment from the effects of mining waste and increasing the base of the construction industry due to recyclable ore processing tailings. The relevance of the new direction of innovative technologies is associated with the use of high-speed disintegrator activators, the fundamental difference of which is that the mechanical activation of enrichment tailings is combined with the chemical extraction of metals from them. The possibility of controlling the processes of ore crushing, combined metal extraction and acceleration of leaching processes is substantiated. A new universal mathematical model of metal extraction processes during ore

leaching and tailings processing in various modes of activator operation has been created. New aspects of the use of IT-technologies in the extraction of metals with mechanochemical activation in the mining industry are shown. It is proved that the completeness of metal extraction during the development of poor ores and man-made reserves can be increased by using mechanochemical technologies with a combination of physical and chemical processes for processing raw materials within the framework of mining. The results of experimental studies are presented to substantiate the advantages and economic efficiency of mechanochemical leaching.

Keywords: mining enterprise, underground technology, activator-disintegrator, waste, ore, metals, mechanochemical activation

For citation: Maslennikov S.A., Stradanchenko S.G., Golik V.I. A model of leaching of metal-containing raw materials with mechanochemical activation. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):59-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-59-64>.

Введение

Состояние современного горного производства характеризуется необходимостью извлекать металлы из бедных и забалансовых руд, техногенных запасов сырья и хвостов переработки руд [1–3].

Вопросам переработки руд в активаторах уделяется повышенное внимание, поскольку на кристаллы руды в растворе одновременно воздействуют силы, ускоряющие полноту и время выщелачивания [4–6]. Комбинирование процессов выщелачивания руды с активацией – эффективно, потому что вместе с дроблением руды в трещины кристаллов под действием инерционных сил нагнетается раствор реагентов. Экологическим компонентом проблемы является создание практически безотходной технологии извлечения металлов из бедных руд и хвостов переработки [7–9].

Пионерные технологии повышения качества продуктов горного производства средствами активации приведены в трудах российских и зарубежных исследователей [10–13]. Наиболее полно исследована эффективность блочного подземного выщелачивания сравнительно легко вскрываемого урана [14–16]. Результаты исследований указывают, что традиционные технологии не извлекают металлы до уровня санитарных норм и значительное количество металлов остается в хвостах переработки. Новизна подходов к технологиям переработки некондиционного сырья заключается в комплексном извлечении металлов в раствор реагентов.

Совершенствование технологий извлечения металлов осуществляется с использованием методов IT-технологий. Полнота извлечения металлов заключается в создании условий для дробления и перемешивания руды или хвостов переработки. Дробление происходит с выделением энергии, что повышает эффективность выщелачивания.

Значимость решаемой проблемы обуславливает необходимость развития дальнейших исследований затронутого направления горного дела [17–20].

Цель исследований: разработка нового подхода к обоснованию экономической эффективности и экологической безопасности выщелачивания металлов.

Методы исследования

Теория механического дробления руд в кислой среде, создание промышленных активаторов, лабораторные и натурные исследования, планирование, статистический, регрессионный и корреляционный анализ результатов экспериментов являются элементами научного обоснования актуальности проблемы [4–6].

Математическая модель дробления руд в дезинтеграторе строится на основе уравнения материального баланса с описанием механизма ударов по кристаллам руды. Модель движения вязких контрвихревых течений растворов в рабо-

чей зоне дезинтегратора создается на основании уравнений Навье – Стокса с распределением параметров движения раствора.

Параметры управления процессами механохимического выщелачивания описываются универсальной математической моделью процесса извлечения металлов при различных режимах работы дезинтегратора:

- описание механизма дробления и выщелачивания сырья, построение математических моделей движения растворов, изучение распределения скоростей и давлений при движении сырья и раствора в дезинтеграторе;
- формализация показателей управления процессами механохимического выщелачивания, экспериментальное обоснование преимуществ механохимического выщелачивания;
- детализация IT-технологий извлечения металлов с механохимической активацией и обоснование экономической эффективности новой технологии;
- применение классических моделей для описания процессов дробления рудных тел, движения вязких контрвихревых течений растворов, планирование экспериментов, использование статистических методов проверки значимости регрессионных зависимостей показателей выщелачивания.

Результаты исследования

Устройство для смешивания состоит из емкости и перемешивающих агрегатов, куда подаются руды и реагенты выщелачивания, которые смешиваются в общем потоке с плотностью ρ . Дезинтегрированные пески (рис. 1) выходят из активатора под действием силы тяжести.

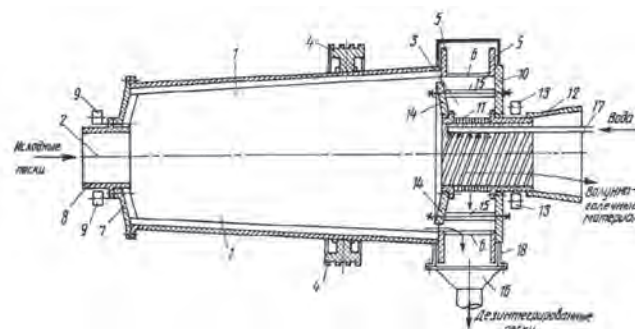


Рис. 1. Схема промышленного дезинтегратора: 1 – барабан; 2 – загрузочное устройство; 3 – разгрузочное устройство; 4 – шкив передачи; 5 – фланцы; 6 – окна для разгрузки; 7 – загрузочная крышка; 8 – загрузочный патрубок; 9 – ролики; 10 – крышка; 11 – цапфа; 12 – диффузор; 13 – ролики; 14 – отбойная плита; 15 – крепление; 16 – приемный лоток; 17 – опрыскивательная труба; 18 – кожух /

Fig. 1. Industrial disintegrator diagram: 1 – drum; 2 – loading device; 3 – unloading device; 4 – transmission pulley; 5 – flanges; 6 – unloading windows; 7 – loading cover; 8 – loading pipe; 9 – rollers; 10 – cover; 11 – journal; 12 – diffuser; 13 – rollers; 14 – baffle plate; 15 – fastening; 16 – receiving chute; 17 – sprinkler pipe; 18 – casing

Содержание фракций в дезинтеграторе равномерно распределено по объему, поэтому в нем происходит мгновенное перемешивание потоков, а параметры смеси резко изменяются.

Влажная руда содержит воду, сухую руду и реагенты:

$$F = Q + W + r \quad (1)$$

где F – производительность транспортировки влажной руды, т/ч;

Q – производительность транспортировки сухой руды, т/ч;

W – расход воды в сухой руде, т/ч;

r – расход реагентов, т/ч.

Объемы воды, реагентов и сухой руды описываются моделью

$$w = \frac{F - Q}{F} \cdot 100\% \quad (2)$$

где w – доля жидкой составляющей в растворе, %.

Решение уравнения материального баланса позволяет определить параметры раствора и его компонентов в характерных узлах процесса.

Уравнение движения вязкой жидкости в виде дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_\theta \frac{\partial u_r}{r \partial \theta} + u_x \frac{\partial u_r}{\partial x} - \frac{u_\theta^2}{r} = \\ = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{P}{\rho} - \Pi \right) + \varepsilon \left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - 2 \frac{\partial u_\theta}{r^2 \partial \theta} \right), \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + u_\theta \frac{\partial u_\theta}{r \partial \theta} + u_x \frac{\partial u_\theta}{\partial x} + u_r \frac{u_\theta}{r} = \\ = -\frac{\partial}{r \partial \theta} \left(\frac{P}{\rho} - \Pi \right) + \varepsilon \left(\nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} + 2 \frac{\partial u_r}{r^2 \partial \theta} \right), \\ \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} + u_\theta \frac{\partial u_x}{r \partial \theta} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} - \Pi \right) + \varepsilon \nabla^2 u_x. \end{cases} \quad (3)$$

Решение указывает на затухающий характер движения потока по времени относительно начального значения вектора скорости $\vec{U}_0$, что означает снижение скоростей однородно-винтового потока по времени и преобразования энергии от составляющей скорости потока в тепловую энергию и энергию межмолекулярного взаимодействия.

Для установившегося режима работы дезинтегратора движение раствора в рабочей зоне установившемся:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} = \frac{\partial u_\theta}{\partial t} = \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Система уравнений движения вязкой жидкости в линеаризованном виде

$$\begin{cases} \frac{u_\theta^2}{r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{P}{\rho V^2} \right), \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial x} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial (r u_\theta)}{r \partial r} \right], \\ \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho V^2} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right), \end{cases} \quad (5)$$

Средняя осевая скорость

$$V = Q / (\pi R^2), \quad (6)$$

где Q – расход потока жидкого раствора;

R – радиус поперечного сечения дезинтегратора;

$\text{Re} = VR/\varepsilon$ число Рейнольдса.

График зависимостей окружных скоростей $u_\theta(r, x)$ с числом Рейнольдса $\text{Re} = 500$ от безразмерной координаты r/R для различных значений продольной координаты $x = kR$, $k = 5, 10, 20, 40, 80, 160$ и с нормированной циркуляцией на входе в цилиндрический канал приведен на рисунке 2.

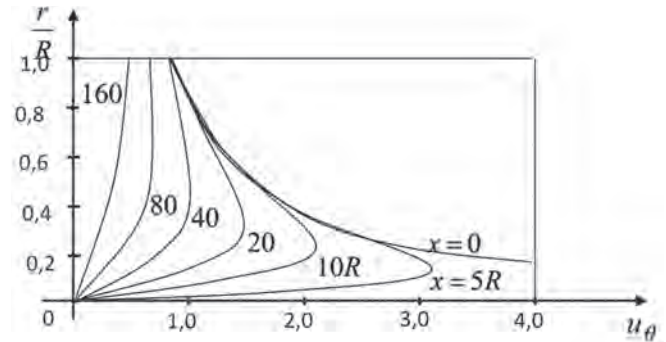


Рис. 2. Распределение окружных скоростей $u_\theta(r, x)$ /
Fig. 2. Distribution of peripheral speeds $u_\theta(r, x)$

Циркуляционное продольное течение, нормированное по средней скорости течения:

$$V = Q / (\pi R^2). \quad (7)$$

Распределение окружных скоростей $u_\theta(r, x, \text{Re})$ для значения числа Рейнольдса приведено на рисунке 3.

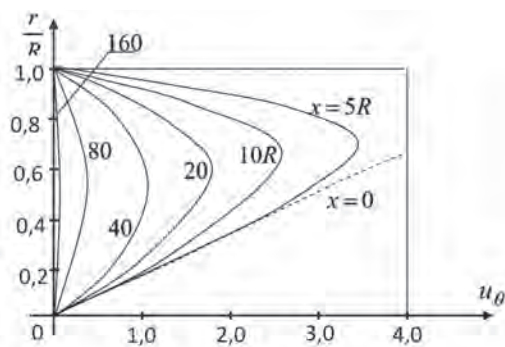


Рис. 3. Распределение окружных скоростей $u_\theta(r, x)$ /
Fig. 3. Distribution of peripheral speeds $u_\theta(r, x)$

Для циркуляционно-продольного потока характерно движение в форме вязкого вынужденного вихря, при этом изменение тангенциальных скоростей вдоль цилиндра дезинтегратора удовлетворяет распределению по экспоненте. При циркуляционно-продольном течении создающие профиль потока касательные напряжения убывают к нулю по продольной координате.

Использование процессов механохимической активации уменьшает энергетические затраты на выщелачивание и увеличивают эффективность технологии.

Динамика развития степени дробления руды характе-

ризуется тем, что показатели дробления руды с увеличением поверхности дробимого вещества возрастают, что подтверждается выщелачиванием хвостов в дезинтеграторе (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Извлечение металлов за 10 минут активации /
Extraction of metals in 10 minutes of activation**

Параметр процесса	Цинк 1	Цинк 2	Свинец 1	Свинец 2	Железо 1	Железо 2
Концентрация HCl в растворе	4–6	8–10	4–6	8–10	4–6	8–10
Извлечение без активации	8–17	26–30	12–29	42–48	15–17	23–28
Извлечение с активацией	32–47	58–71	31–43	49–52	24–44	55–64
Концентрация HCl в растворе	12–16	20	12–16	20	12–16	20
Извлечение без активации	36–39	42	52–56	60	31–33	37
Извлечение с активацией	75–85	89	64–66	70	70–75	79

Из таблицы 1 следует, что извлечение металлов в раствор при применении механохимической активации хвостов возрастает.

Параметры активизации процессов выщелачивания возрастают при условии комбинирования механической активации и теплового воздействия (рис. 4).

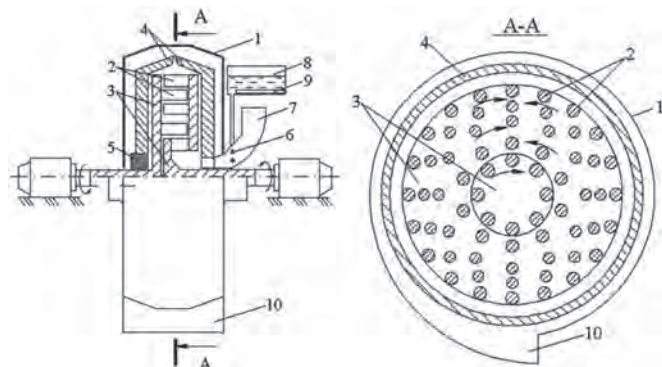


Рис. 4. Модернизация конструкции дезинтегратора /
Fig. 4. Modernization of the disintegrator design

Конструкция дезинтеграторной установки включает в себя корпус 1, ряды пальцев 2 на дисках 3-4, где один диск жестко соединен с валом электродвигателя, а второй закреплен в точке 5, форсунки 6, входной патрубок 7, емкость для жидкости 8, нагревательный элемент 9 и выпускную решетку 10.

Дробление хвостов в дезинтеграторе увеличивает однородность и прочность бетонной смеси. В эксперименте прочность исследовалась при следующих параметрах смеси: хвосты переработки – 1 445 кг/м³, цемент – 10 кг/м³, вода – 380 кг/м³; 40 % выхода – класса 0,076 мм (табл. 2).

Повторенная трижды механохимическая переработка хвостов дает прочность смеси порядка базовой при расходе цемента 100 кг/м³. Механоактивация хвостов повышает прочность смеси без связывающего цемента (табл. 3).

Таблица 2 / Table 2

**Зависимость прочности смесей от способа активации /
Dependence of the strength of mixtures on the activation method**

Компоненты смесей, кг/м ³				Прочность, МПа		
				Срок хранения кубов, сутки		
Цемент	Вяжущие	Инертные	Вода	14	28	90
Активация в шаровой мельнице						
40	400	1 200	350	0,30	0,42	0,61
80	360	1 200	350	0,44	0,62	0,73
120	320	1 200	350	0,82	1,03	1,25
180	260	1 200	350	1,09	1,24	1,57
Активация в дезинтеграторе						
40	400	1 200	350	0,62	0,94	1,19
80	370	1 200	350	0,92	1,22	1,44
120	320	1 200	350	1,22	1,41	1,67
180	260	1 200	350	1,62	1,71	2,13

Таблица 3 / Table 3

**Набор прочности смесей со временем /
Strength gain of mixtures over time**

Способ активации	Прочность смеси, МПа, возраст, сутки		
	7	14	28
Без активации с расходом портландцемента 100 кг/м ³	1,02	1,13	1,18
Механическая активация без реагентов	1,17	1,24	1,34
Агитационное выщелачивание без активации	0,53	0,62	0,74
Механическая активация с выщелачиванием в агитаторе	0,67	0,72	0,89
Механохимическая активация в дезинтеграторе	0,72	0,76	0,92
Троекратная механохимическая активация в дезинтеграторе	0,94	1,12	1,24

Эффективность передела хвостов повышается при комбинировании механоактивации и электроакустического воздействия акустических излучателей на внутренней поверхности рабочей камеры. Комбинирование улучшает показатели измельчения хвостов, что увеличивает прочность бетонных конструкций и расширяет возможности утилизации хвостов.

Эколого-экономическая эффективность переработки хвостов:

$$P_y > V_c + 3_n, \quad (8)$$

где P_y – прибыль от утилизации хвостов;

V_c – штрафы при нанесении ущерба природной среде;

3_n – затраты на утилизацию хвостов.

В результате дезинтеграторного дробления малая доля фракций имеет размеры более 125–400 мкм и менее 5 мкм, а основная часть фракций имеет размеры от 5 до 125 мкм. При помоле в шаровой мельнице высокодисперсные фракции обеспечивают существенное значение удельной поверхности ($S_{уд} = 4\,930 \text{ см}^2/\text{г}$) при относительно малой доле ее содержания (10,6 %).

Для обоснования перспектив активации процессов гидрометаллургического передела необходимо решить ряд задач: создания универсальной математической модели выщелачивания в дезинтеграторе; разработки программно-

го обеспечения процессов механохимической активации; создания методики нахождения эколого-экономического эффекта при механохимической активации процессов выщелачивания.

Выводы

1. Полнота извлечения металлов при разработке бедных руд и техногенных запасов увеличивается посредством применения механохимических технологий с сочетанием физических и химических процессов переработки.

2. Универсальная математическая модель процессов извлечения металлов при выщелачивании позволяет автоматизировать процесс извлечения металлов из бедных руд и техногенных запасов и повысить полноту использования недр.

3. Преимущества и экономическая эффективность выщелачивания с механохимической активацией обоснована теоретически и подтверждается практикой.

4. Резервом повышения параметров извлечения металлов с механохимической активацией является внедрение IT-технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Абрамкин Н.И. и др. Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья и отходов обогащения руд. *Горный информационный аналитический бюллетень*. 2023; 12-1: 17-30. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_121_0_17.
- Valiev N.G., Propp V.D., Abramkin N.I., et al. The practice of leaching metals from substandard raw materials and ore dressing waste. *Mining Information Analytical Bulletin*. 2023; 12-1: 17-30. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_121_0_17.
- Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А. и др. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов. *Горный журнал*. 2017; 12: 46-51. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>.
- Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., et al. Improving the economic efficiency of mining enterprises by involving man-made georesources in the exploitation. *Mining Journal*. 2017; 12: 46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>.
- Adero N.J., Drebenstedt C., Prokofeva E.N., et al. Spatial data and technologies for geomonitoring of land use under aspect of mineral resource sector development. *Eurasian Mining*. 2020; 1: 69-74. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.14>.
- 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: 134-139.
- Valiev N.G., Golovyryin S.S., Makarov V.V. On the issue of using 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; S23: 134-139. (In Russ.).
- Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х. и др. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России. *Вектор Гео Науки*. 2019; 2 (1): 9-18.
- Dmitrak Yu.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.H. Mineral resource base of non-ferrous metallurgy of Russia. *Vector of Geo Sciences*. 2019; 2 (1): 9-18. (In Russ.).
- Parameswaran K. Sustainability considerations in innovative process development. V.I. Lakshmanan and all. (eds.). *Innovative Process Development in Metallurgical Industry*. Switzerland, 2016: 257-280. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21599-0_18.
- Кожиев Х.Х., Босиков И.И. Комплексный показатель перспективности разработки участков месторождений полезных ископаемых. *Горный журнал*. 2017; 2: 101-107.
- Kojiev Kh. K., Bosikov I.I. A comprehensive indicator of the prospects for the development of mineral deposits. *Mining magazine*. 2017; 2: 101-107. (In Russ.).
- Аренс В.Ж., Гридин О.М., Дербунович Н.Н. и др. Опыт подземного выщелачивания желваковых фосфоритов. *Горный журнал*. 2016; 6: 56-63.
- Arens V.Zh., Gridin O.M., Derbunovich N.N., et al. Experience of underground leaching of nodular phosphorites. *Mining Journal*. 2016; 6: 56-63. (In Russ.).
- Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*. 2012; 15: 90-97.
- Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Бетров З.С. и др. Оценка природных и техногенных месторождений Республики Северная Осетия-Алания как возможных объектов применения технологий подземного и кучного выщелачивания. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2016; 8(1): 46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51>.
- Khulelidze K.K., Kondratiev Yu.I., Betrov Z.S., et al. Assessment of natural and man-made deposits of the Republic of North Ossetia-Alania as possible objects of application of technologies of underground and heap leaching. *Sustainable development of mountainous territories*. 2016; 8(1): 46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51>.
- Хайрутдинов А., Конгар-Сюрюн Ч., Ковалик Т. и др. Улучшение характеристик обратной засыпки путем активации отходов обогащения галита для безотходной геотехнологии. *Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия*. 2020; 867 (1): 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012018>.
- Khairutdinov A., Kongar-Suryun Ch., Kovalik T., et al. Improving the characteristics of backfilling by activating halite enrichment waste for waste-free geotechnology. *IOP Conference series: Materials Science and Engineering*. 2020; 867(1): 012018. (In Russ.). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012018>.
- Minagawa M., Hisatomi S., Kato T. et al. Enhancement of copper dissolution by mechanochemical activation of copper ores: Correlation between leaching experiments and DEM simulations. *Advanced Powder Technology*. 2018; 29 (3): 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.11.031>.
- Kamariah N., Kalebic D., Xanthopoulos P., et al. Conventional versus microwave-assisted roasting of sulfidic tailings: mineralogical transformation and metal leaching behavior. *Minerals Engineering*. 2022; 183: 107587. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107587>.
- Морозов А.А., Смагин А.П., Безнос Г.Ф. и др. Технико-экономическая оценка эффективности блочного подземного выщелачивания урана из бедных руд Стрельцовского рудного поля. *Горный журнал*. 2013; 8-2: 78-84.
- Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., et al. Technical and economic assessment of the effectiveness of block underground leaching of uranium from poor ores of the Streltsovsky ore field. *Mining Journal*. 2013; 8-2: 78-84. (In Russ.).

15. Рассказова А.В., Секисов А.Г., Бурдонов А.Е. Активационное выщелачивание упорных первичных руд Малмыжского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 1: 130-141. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_130.
Rasskazova A.V., Sekisov A.G., Burdonov A.E. Activation leaching of persistent primary ores of the Malmyzhskoye deposit. *Mining information and analytical bulletin*. 2023; 1: 130-141. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_130.
16. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б. и др. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13 (3(49)): 406-415. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>.
Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kongar-Suryun Ch.B., et al. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable development of mountainous territories*. 2021; 13 (3(49)): 406-415. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>.
17. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В. и др. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике. *Горные науки и технологии*. 2021; 6(2): 73-89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>.
Ignatieva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., et al. Technogenic mineral formations: problems of transition to a circular economy. *Mining sciences and technologies*. 2021; 6(2): 73-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>.
18. Каплунов Д.Р., Юков В.А., Лавенков В.С. О влиянии годовой производительности на эффективность методов подземного выщелачивания медных руд. *ГИАБ*. 2017; 10: 5-11. Kaplunov D.R., Yukov V.A., Lavenkov V.S. On the effect of annual productivity on the effectiveness of methods of underground leaching of copper ores. *GIAB*. 2017; 10: 5-11. (In Russ.).
19. Chen G., Chen J., Peng J. Effect of mechanical activation on structural and microwave absorbing characteristics of high titanium slag. *Powder Technology*. 2015; 286: 218-222. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.021>.
20. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Самусев А.Л. и др. Теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы и водные суспензии. *Горный журнал*. 2017; 11: 120-125.
Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Samusev A.L., et al. Theory and practice of application of combined physico-chemical and energy effects on geo-materials and aqueous suspensions. *Mining magazine*. 2017; 11: 120-125. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Станислав Александрович Масленников –

канд. техн. наук, заведующий кафедрой строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, 346500, г. Шахты, Российская Федерация; e-mail: mail@sssu.ru

Сергей Георгиевич Страданченко –

д-р техн. наук, профессор, ректор Южно-Российского государственного политехнического университета, 346428, г. Новочеркасск, Российская Федерация; e-mail: ssg72@mail.ru

Владимир Иванович Голик –

д-р техн. наук, профессор, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, 362002, г. Владикавказ, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@yail.ru

Сергей Алексеевич Нохрин –

заместитель генерального директора, ООО «ТехноЭКО», 653046, г. Прокопьевск, Российская Федерация; e-mail: nsa500@mail.ru

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.08.2025

Поступила после рецензирования: 10.12.2025

Принята к публикации: 18.12.2025

ABOUT THE AUTHORS

Stanislav A. Maslennikov –

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Construction and Technosphere Safety at the Institute of Service and Entrepreneurship (branch) DSTU, 346500, Shakhty, Russian Federation; e-mail: mail@sssu.ru

Sergey G. Stradanchenko –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the South Russian State Polytechnic University, 346428, Novocherkassk, Russian Federation; e-mail: ssg72@mail.ru

Vladimir I. Golik –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 362002, Vladikavkaz, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@yail.ru

Sergey A. Nokhrin –

in Engineering, Deputy General Director, TechnoEKO Limited Liability Company, 653046, Prokopyevsk, Russian Federation; e-mail: nsa500@mail.ru

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article. Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 08.08.2025

Revised: 10.12.2025

Accepted: 18.12.2025