



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-184>

УДК 504.55.054:622(470.6)

Экологически чистые геотехнологии выщелачивания металлов из твердых и жидких отходов обогащения полиметаллического сырья

В.И. Голик^{1,2}  , Ю.И. Разоренов³  ,
Н.Г. Валиев⁴  , О.А. Гаврина⁵  

¹Московский политехнический университет (МПУ), г. Москва, Российская Федерация

²Северо-Кавказский горно-металлургический институт, (СКГТИ), г. Владикавказ, Российская Федерация

³Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

⁴Уральский государственный горный университет (УГГУ), г. Екатеринбург, Российская Федерация

⁵Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация

✉ v.i.golik@mail.ru

Аннотация

Глобальные вызовы (рост потребления георесурсов, климатические изменения, ограниченность запасов) повышают актуальность проблем роста накопления отходов и экологической модернизации добычи минерального сырья. В связи с этим существующие подходы к проектированию геотехнологий добычи металлов нуждаются в совершенствовании на основе концепции циркуляционного управления отходами и экологизации технологических процессов. Статья посвящена вопросу формирования концептуальных основ и направлений экологизации геотехнологий при выщелачивании металлов из твердых и жидких отходов обогащения полиметаллического сырья. В исследовании предложены рекомендации по совершенствованию подземного выщелачивания руд в блоках, позволяющие определить оптимальные условия для повышения полноты использования недр и уменьшения ущерба окружающей среде. Выявлено, что при извлечении металлов с циркуляцией раствора через рассольные камеры содержание ионов (Na, Cl, SO₄ и Ca) в диализате было низким, а без циркуляции в рассоле существенно превышало ПДК (по Na, Cl, SO₄ и Ca). Это доказывает принципиальную возможность управления процессами подземного выщелачивания путем усиления окислительного потенциала растворителей за счет добавления промышленных окислителей. Установлено, что рост продолжительности агитационного выщелачивания (как с использованием, так и без механоактивации) приводит к равномерному расширению локальных максимумов выхода Pb из пульпы при снижении минимальной концентрации NaCl с 11–12 до 7 % при H₂SO₄ = 0,6 %. Одним из ключевых результатов исследования является обоснование расширения области использования дезинтеграторов для осуществления направленного активационного воздействия на хвосты обогащения. Практическое значение полученных результатов заключается в возможности оптимизации технологической схемы электрохимического извлечения металлов из техногенных стоков на основании полученных результатов применения циркуляции рассолов через рассольные камеры. Кроме того, совокупность полученных результатов использования дезинтегратора для повторного извлечения свинца из геоматериалов позволит разработать методику расчета параметров механоактивационного воздействия для повышения степени извлечения металлов из хвостов обогащения полиметаллического сырья РСО–Алания (Згидское, Садонское, Архонское месторождения). Наиболее перспективным направлением дальнейших исследований является обоснование путей использования подземного пространства для полного захоронения отходов (техногенных стоков и хвостов обогащения) после их многостадийной обработки.

Ключевые слова

хвосты обогащения, растворы/стоки, кислотное выщелачивание, механохимическая активация, извлечение Pb, геотехнологии, управление отходами

Для цитирования

Golik V.I., Razorenov Yu.I., Valiev N.G., Gavrina O.A. Environmentally sound geotechnologies for leaching metals from polymetallic ore processing wastes and wastewater. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):271–282. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-184>



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Environmentally sound geotechnologies for leaching metals from polymetallic ore processing wastes and wastewaterV.I. Golik^{1,2}  , Yu.I. Razorenov³  , N.G. Valiev⁴  , O.A. Gavrina⁵  ¹ Moscow Polytechnic University (MPU), Moscow, Russian Federation² North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (NCSTU), Vladikavkaz, Russian Federation³ M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation⁴ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation⁵ Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation v.i.golik@mail.ru**Abstract**

Global challenges (increased consumption of georesources, climatic changes, limited reserves) increase the relevance of the problems of growing waste accumulation and environmentally-sound modernization of mineral extraction. In this regard, the existing approaches to the design of geotechnologies for metal mining need to be improved based on a concept of so-called circulation waste management and ecologization of technological processes. The paper is devoted to the issue of formation of conceptual bases and directions of ecologization of geotechnologies at leaching metals from polymetallic ore processing wastes and wastewater. The study presents recommendations for improving in-situ leaching of ores in blocks, allowing to determine the optimal conditions for increasing the completeness of subsoil use and reducing environmental damage. It was revealed that at metal extraction with solution circulation through brine chambers the content of Na, Cl, SO₄ and Ca ions in dialysate was low, while without circulation through brine, it significantly exceeded corresponding MPCs. This proves the fundamental feasibility of controlling natural leaching processes by enhancing the oxidizing potential of natural solvents through the addition of industrial oxidizing agents. It was found that increasing the duration of agitation leaching (both with and without mechanoactivation) leads to a uniform expansion of the local maximums of Pb yield from the pulp when the minimum NaCl concentration decreases from 11–12 to 7% at H₂SO₄ concentration of 0.6%. One of key results of the study is justifying the expansion of the use of disintegrators to realize targeted activation of tailings. The practical significance of the obtained results lies in the proved feasibility of optimizing the flow sheet of electrochemical extraction of metals from wastewater on the basis of the obtained regularities of the use of brine circulation through brine chambers. In addition, the totality of the obtained results of using a disintegrator for re-extraction of lead from geomaterials will allow developing a methodology for calculating the parameters of mechanoactivation action to increase the degree of metal recovery from the tailings of North Ossetia-Alania's (Zgidskoe, Sadonskoe, Arkhonskoe deposits) polymetallic ores beneficiation. The most promising way for further research is to substantiate methods of using underground space for complete removal of wastes (wastewater and tailings) after their multistage treatment.

Keywords

tailings, wastewater, acid leaching, mechanochemical activation, Pb recovery, geotechnologies, waste management

For citation

Golik V.I., Razorenov Yu.I., Valiev N.G., Gavrina O.A. Environmentally sound geotechnologies for leaching metals from polymetallic ore processing wastes and wastewater. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):271–282. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-184>

Введение

Горнодобывающие предприятия по всему миру увеличивают темпы накопления различных видов отходов, обуславливая деградацию окружающей среды, в связи с ростом производства, постепенным переходом к отработке бедных и вкрапленных руд, а также вследствие усложнения горнотехнических условий отработки месторождений полезных ископаемых [1–3]. Большие объемы данных, полученных с предприятия,

могут быть использованы для снижения потребления ресурсов и оптимизации запасов на шахтах с использованием технологии цифровых двойников [4]. Цифровые модели геологических запасов полезных ископаемых в сочетании с ГИС технологиями позволяют формировать цифровые двойники месторождений, обуславливая проектирование более рациональных систем разработки [3]. При этом решения некоторых экологических проблем можно достичь



при оптимизации существующих технологических процессов, а также при повышении качества управления природно-техническими системами [5, 6].

Способы кучного выщелачивания, которые широко используются в мире, позволяют с большей прибылью извлекать металлы из различных видов низкосортных руд. При этом даже существующий уровень понимания фундаментальных его основ не позволяет полностью обеспечить экологически безопасные реализации при стремлении к устойчивому освоению минерально-сырьевой базы [7]. Это порождает проблему образования техногенных стоков, сухих отвалов и пылевых загрязнений. Для каждого объекта пыления характерны индивидуальные особенности, что позволяет использовать модели технологических процессов для минимизации выбросов в атмосферу, но не полностью решить данную проблему [8]. Минимизация последствий загрязнения гидросферы требует разработки мер, учитывающих целый комплекс взаимно обусловленных факторов [9, 10]. Хвостохранилища являются техногенными месторождениями, сложенными хвостами переработки руд, которые участвуют в загрязнении окружающей среды химическими ингредиентами в результате процессов выщелачивания [11–14]. Так, в нашей стране уже складировано более 45 млрд т твердых отходов (осуществляющих в том числе пыление) в виде отвалов, из которых отходы обогащения ежегодно добавляют в эту цифру около 140 млн м³/год [15].

Решение проблем отходов при извлечении полиметаллического сырья может быть достигнуто при экологизации и широком использовании геотехнологий подземного выщелачивания. Прогрессивные технологии подземного выщелачивания в блоках осваиваются в добывающих отраслях для сохранения и упрочнения минерально-сырьевой базы технологически развитых стран [16, 17]. История возникновения и освоения технологии с подземным блоковым выщелачиванием на предприятиях атомной энергетики СССР в Казахстане описана в [18], в то же время отдельные процессы остаются недостаточно изученными. Так, для Джимидонского рудного поля увеличение доступности для переработки низкокондиционных запасов полиметаллического сырья возможно достичь путем повышения качества разрушения и избирательного расхода энергии при взрывной подготовке руд [19]. На горных предприятиях России, прежде всего в атомной промышленности, технологии с подземным блоковым выщелачиванием используются при добыче большой доли товарной продукции, например, в Приаргунском ГХК. При этом используется неоптимальная топология сети поверхностных скважин, которая не позволяет использовать направленное бурение для минимизации количества нагнетательных скважин (при их бурении параллельно рудному телу), что приводит к росту отходов при низкой эффективности подземного выщелачивания [20].

Скорость процессов выщелачивания определяется содержанием металлов, толщиной диффузионного слоя и коэффициентом диффузии. Скорость

химической реакции имеет решающее значение для извлечения редкоземельных элементов в процессе подземного выщелачивания (которая (реакция) сопровождается миграцией ионов, что придает ей электрохимический характер), при этом наиболее важными являются два параметра: сопротивление раствора и сопротивление переносу заряда [21]. Кроме того, максимальное извлечение соответствует высокой скорости движения раствора относительно реакционной поверхности. На Кавказе большинство эксплуатируемых месторождений относится к типу кварц-полиметаллических месторождений в кварц-кератофировой формации, например, Садонское. Для него характерны полиметаллический и пирротинный виды оруденения. Воды являются причиной процесса гидролиза. При достижении определенной кислотности сульфат железа вступает в реакцию с образованием гидроксида железа. Из методов очистки растворов наиболее часто применяют химический, недостаток, которого заключается в возможности загрязнения окружающей среды реагентами при аварийном нарушении технологического режима.

Существующие математические методы управления процессами выщелачивания требуют большого объема априорной информации о структуре и свойствах месторождения, при этом одним из основных методов является метод экспертных оценок, который не обладает достаточной надежностью получаемых результатов [22, 23]. Отмеченные особенности горного производства наиболее остро проявляются при осуществлении процессов, где погрешность может снизить показатели технологического процесса до неприемлемого уровня [24, 25]. Так, при ошибке в параметрах отбойки руд для выщелачивания становится невозможно использовать высокоэффективную технологию с растворением металлов.

Существующие подходы к проектированию геотехнологий добычи металлов нуждаются в совершенствовании на основе концепции так называемого «циркуляционного» управления отходами и экологизации технологических процессов [26, 27]. В работе [28] убедительно доказана необходимость решения первостепенных задач для «форсирования перехода к «циркуляционной» экономике в условиях обращения с техногенными минеральными образованиями». Недостатком реализации авторской идеи о формировании путей для достижения цели является восприятие «циркуляционного» подхода, как «концепции замкнутых цепей поставок». В то время как, например, для шахтного метана ее формируют как «преобразование отходов (метана) в энергию» [29, 30]. В связи с этим авторская гипотеза «циркуляционного» управления хвостами обогащения заключается в: «оптимизации технологических процессов выщелачивания, механохимической активации геоматериалов или иных способов, позволяющих трансформировать отходы обогащения в дополнительно извлекаемые металлы с последующим использованием хвостов в производстве строительных материалов или в объектах захоронения (инертный заполнитель подземного пространства)».



В связи с этим **целью** исследования является формирование концептуальных основ и направлений экологизации геотехнологий выщелачивания металлов из твердых и жидких отходов обогащения полиметаллического сырья. В связи с этим необходимо решить следующие **задачи**: 1 – провести анализ и привести классификацию мер по совершенствованию подземных геотехнологий выщелачивания металлов; 2 – провести моделирование процесса электрохимического метода извлечения металлов из стоков (растворов); 3 – обосновать эффективность извлечения металлов с использованием предварительной механохимической активации сухих хвостов.

Методы

Объектом исследования являются техногенные месторождения РСО–Алании (Россия). Интенсивная эксплуатация рудных месторождений сопровождается образованием отвалов некондиционных руд и хвостов обогатительных фабрик, располагающихся в долинах рек.

Количественные значения и параметры промышленных стоков в условиях месторождения Садонского рудного узла приведены в табл. 1.

Объемы хранения хвостов обогащения фабрик Северного Кавказа приведены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристика промышленных стоков

Месторождения	Объем стоков, м ³ /ч	Содержание металлов, г/м ³
Садонское	300	Свинец – 5, цинк – 7
Згидское	24	Свинец – 5, цинк – 12
Холстинское	70	Свинец – 8, цинк – 25
Архонское	30	Свинец – 65, цинк – 7
Хаником-Какадурское	150	Свинец – 5, цинк – 100
Урупское	350	Медь – 12, цинк – 41, железо – 0,2
Тырныаузское	400	Молибден – 37, вольфрам – 45

Таблица 2

Объемы хранения хвостов переработки руд

Хвостохранилища	Количество хвостов обогащения, т	Содержание металлов, %
Мизурская фабрика	3 000 000	Цинк – 0,15–0,25, свинец 0,13–0,19
Фиагдонская фабрика	3 000 000	Цинк – 0,18–0,24, свинец – 0,18–0,24
Завод «Электроцинк»	3 000 000	–
Урупская фабрика	4 000 000	Цинк – 0,25–0,40, медь – 0,36–0,46, железо – 30–35
Тырныаузская фабрика	120 000 000	Вольфрам – 0,25–0,40, медь – 0,36–0,46, железо – 30–35

Для оценки перспектив в области совершенствования подземных геотехнологий осуществлялся ретроспективный анализ теории и практики применения технологических новаций на предприятиях Министерства атомной энергетики и промышленности СССР.

При реализации второй задачи изучались техногенные растворы (стоки) с реагентами для выщелачивания, прошедшими электрохимическую обработку. Сульфатно-хлоридные с преобладанием катионов натрия стоки Архонского комбината (РСО–Алания) исследованы на установке во Всесоюзном научно-исследовательском институте химической технологии (г. Москва). Базой для определения эффективности выщелачивания металлов являются результаты выщелачивания руд и продуктов их переработки в перколяторных колоннах с использованием реагентов.

Третью задачу решали на основе испытаний технологий по переработке хвостов обогащения Мизурской обогатительной фабрики. Активацию пульпы проводили с помощью высокоэнергетического измельчения в DESI-11 с частотой вращения ротора 50 и 200 Гц в течение 0,25 и 1 ч соответственно. Для образования пульпы измельченные образцы хвостов пропускали через сито 2,0 мм и смешивали с фильтратом. Методика моделирования составлена по аналогии с методикой, рассмотренной в работах [31–33], и заключалась в обработке данных на основе фильтра Савицки–Голя в сочетании с трехмерной интерполяцией по методу R.J. Renka (Роберта Ренки) [34–36]. Реализация алгоритмов была выполнена в виде «скриптов» (с использованием ПО Vi IMproved (version 9.0)) на языке Python (version 2.7.10). Построение итоговых трехмерных графиков ПО Gnuplot (version 5.4).

Результаты

Совершенствование геотехнологии подземного выщелачивания металлов

Выщелачивание полиметаллического сырья является процессом фильтрации водного раствора через пласты породы под действием силы тяжести, капиллярных сил на межфазных границах либо из-за градиента давлений в нагнетательных и откачных (продуктивных) скважинах. Внутренняя структура пористой среды является случайной, и ее геометрия может быть описана лишь приближенно, соответственно определение параметров течения водных растворов на основе уравнений гидравлики возможно лишь приближенно, с некоторой вероятностью.

Основными параметрами процесса фильтрации являются вязкость, проницаемость, скорость и давление жидкости [37, 38]. Жидкость, движущаяся в пористой среде, является неньютоновской, для которой соотношение, связывающее скорость изменения деформации с напряжением, описывается реологическим законом:

$$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu \frac{\partial u_x}{\partial y}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость; τ_0 – начальное напряжение сдвига; u_x – скорость течения в перпендикулярном оси ОХ направлении.



В пористой среде неньютоновская жидкость удовлетворяет уравнению движения и уравнению неразрывности при отсутствии притоков и стоков:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} &= -\nabla \bar{p} + \nabla(\bar{\tau} - \rho \bar{V}' \bar{V}'), \\ \frac{\partial(\rho m)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{V}) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ – плотность среды; m – пористость; $\bar{V}$ – вектор скоростей; $\bar{p}$ – распределение давлений; $\bar{\tau}$ – тензор напряжений.

Проницаемость рудных пластов в зависимости от плотности различна, но в условиях хаотичного изменения характеристик фильтрации в каждой точке пласта можно принять его состояние однородно-проницаемым. Если же фильтрационные характеристики пласта пористость и проницаемость – на отдельных участках различны, то пласт является неоднородным.

В математической модели потенциального течения суммарный дебит пласта представляет собой сумму дебитов всех слоев. Для упрощения неоднородный пласт моделируется как квазиоднородный со средней проницаемостью пласта

$$k_{cp} = \sum_i \frac{k_i h_i}{h}, \quad (3)$$

где k_i – проницаемость i -го слоя; h_i – толщина i -го слоя; h – толщина всего пласта.

В обобщенном виде модель диффузии растворов для выщелачивания металлов из руд может быть представлена уравнением Фоккера–Планка:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \left[- \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} D_i^1(x_1, x_2, x_3) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i \partial x_j} D_{ij}^2(x_1, x_2, x_3) \right] W, \quad (4)$$

где $W(\bar{V}, t)$ – плотность вероятности скоростей; D^1 – вектор сноса потока; D^2 – тензор диффузии.

Наличие в прилегающем к твердой фазе вещества слоя частиц крупностью более 5 мм увеличивает интенсивность переноса металлических частиц в извлекаемом растворе.

Оптимальным является способ выщелачивания, обеспечивающий перевод металлов в мобильное состояние с минимальными затратами на подготовку руд и обеспечение проницаемости раздробленной руды для выщелачивающих растворов. Технологии добычи полезных ископаемых, в том числе методами выщелачивания, и отдельные их элементы оцениваются по критерию полноты извлечения металлов из руд [39, 40]. Из анализа исследований [41] следует, что меры по совершенствованию подземного выщелачивания руд в блоках (с управляемой проницаемостью пород/руд для растворов) можно систематизировать (табл. 3).

Таблица 3

Меры совершенствования подземного выщелачивания руд в блоках

Процесс	Сущность процесса	Эффект осуществления
1	2	3
Отбойка и дробление взрывом	Горизонтальная подсечка взрыванием скважин с опережением на толщину вертикального слоя	Рационализация формирования компенсационного пространства, оптимизация крупности магазинируемой руды
	Отбойка слоями с переменной линией наименьшего сопротивления	
	Приближение формы слоя к вертикальной проекции фигуры выпуска	
Орошение растворами реагентов	Скважины с обсадкой и размещением тонкозернистого слоя в отбитой руде	Равномерное орошение растворов реагентов в объеме магазинированной руды и времени
	Гидравлический разрыв пород	
Сбор растворов	Улавливание утечек растворов электровакуумными установками	Оптимизация расхода реагентов
	Дренаж перфорированными трубами в днище блока	
	Создание противо фильтрационных экранов из полимерных материалов	Минимизация ущерба окружающей природной среде
Интенсификация процесса	Использование в скважинах в отбитой руде жидких взрывчатых веществ	Смещение кусков выщелоченной руды с разрушением кольматированных зон
	Подвижка руды при отбойке на нее новых слоев	
	Воздействие импульсами сжатого воздуха высокого давления	Повышение проницаемости при перемещении трещинных заполнителей и разрушении глинистых пленок
	Воздействие ультразвуком при электромагнитной обработке растворов с пропусканием их в поле электрического тока	
	Воздействие пульсирующим электрическим током с низкочастотными импульсами	
Комбинирование разработки разносортных руд	Выемка балансовых руд для традиционной переработки, магазинирование части балансовой и забалансовой руды и выщелачивание	Комплексное улучшение показателей разработки месторождений

Моделирование эффективности извлечения металлов из растворов

Метод электрохимического умягчения концентрированных растворов посредством электродиализного опреснения заключается в использовании явления селективности ионообменных мембран: катионообменные мембраны пропускают положительные ионы, а анионообменные мембраны – отрицательные ионы.

Мембранный электролиз обеспечивает безреагентное умягчение природных растворов и концентрирование микроэлементов. Перспективны электродиализ и активация в диафрагменных электролизерах с разложением солевых систем на кислоту и щелочь и нейтрализацией растворов. Недостатком метода является осаждение труднорастворимых соединений в рассольных камерах.

Параметры извлечения из раствора металлов определяются для вариантов с циркуляцией раствора через рассольные камеры и без циркуляции. В камеру обессоливания подаются растворы (стоки), а в камеру кислотно-щелочного образования – чистая вода. После этого в камеры подают реагенты, необходимые для образования щелочи и кислоты (выбранные для реализации технологического цикла). С ростом доли ионов магния, кальция и кислот проявляется ухудшение эффективности исследуемого процесса, обусловленное снижением качества контакта мембраны с рассолом вследствие налипания карбонатных отложений и оксида магния. Энергозатраты на удаление 1 кг соли составляют 0,6 кВт (при остаточных долях $Zn = 0,3–0,4$ мг/дм³ и $Pb = 0,06–0,08$ мг/дм³ соответственно).

Для реализации авторского подхода проведена серия опытов для различных схем циркуляции рассолов, полученные значения для которых представлены в табл. 4 и рис. 1, 2.

Из анализа поверхности, представленной на рис. 1, следует, что вариант электрохимического способа с циркуляцией рассолов через рассольные камеры является наиболее эффективным способом извлечения металлов из промышленных стоков. Извлечение металлов из рассолов осуществляется в сорбционных и отмывочных колоннах высотой до 4 м при диаметре 1–1,5 м. Расход реагентов на 1000 м³ раствора: катионита (анионита) – 0,8 кг; регенерирующего реагента – 100–150 кг.

Из анализа значений, представленных на рис. 3, следует, что значения для Na, Ca, Cl и SO₄ существенно превышают ПДК (Na – 6089, Ca – 650, Cl – 4600 и SO₄ – 153 мг/дм³).

Таблица 4

Эффективность извлечения металлов из растворов (стоков) при разном типе циркуляции раствора

Компонента	N	Исходный раствор (стоки)	Эффективность извлечения металлов из растворов (стоков)	
			с циркуляцией рассолов через рассольные камеры	без циркуляции
			в дилуате	
Варианты модели		1	2	3
Pb	1	2,2±0,3	0,1±0,02	0,08±0,02
Zn	2	40±1,2	0,4±0,05	0,3±0,03
Mg	3	70±1,9	10±2	8±1,1
Ca	4	200±6	30±1,2	40±1,7
Na	5	450±15	72±1,5	90±1,3
SO ₄	6	580±20	100±11	95±4
Cl	7	900±5	114±19	105±5

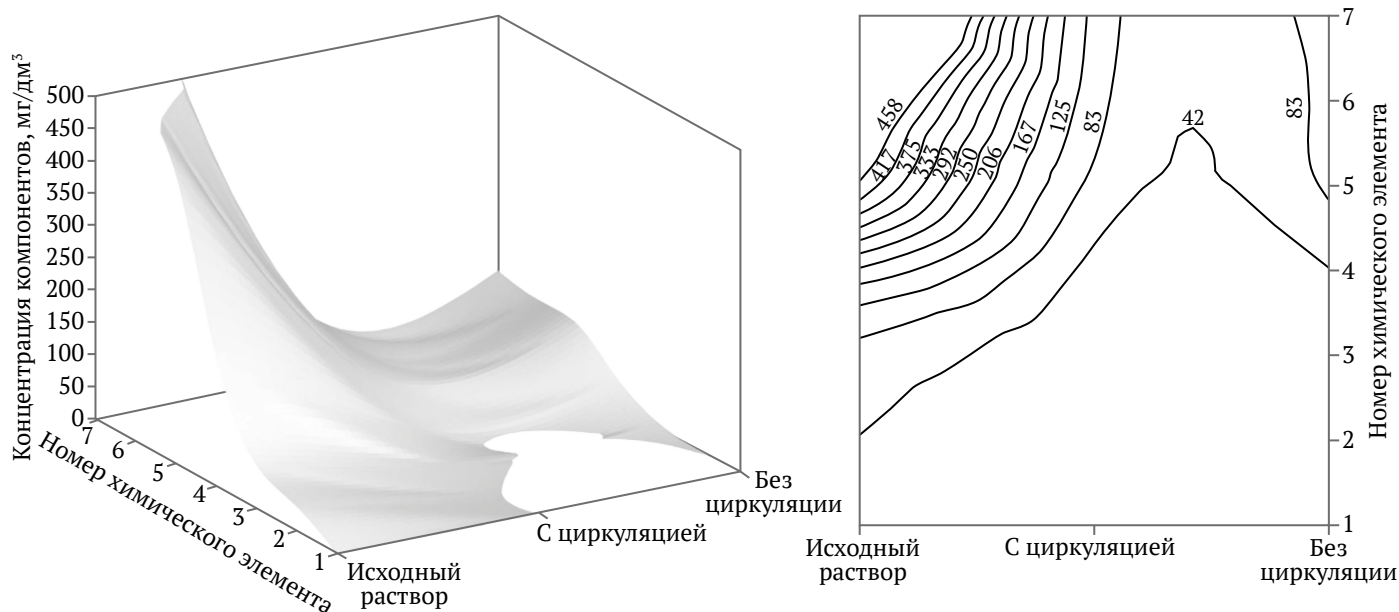


Рис. 1. Эффективность извлечения химических элементов при различных параметрах электрохимического способа

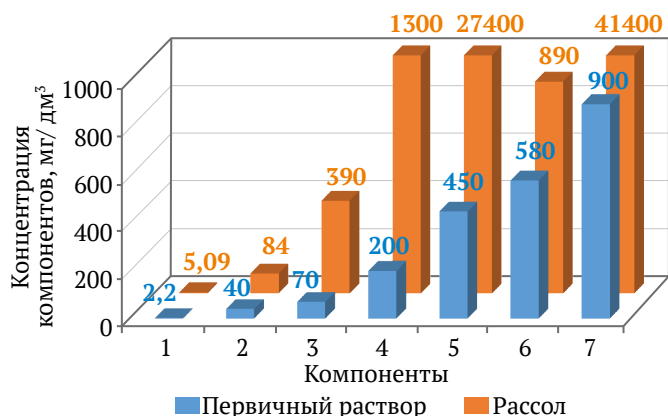


Рис. 2. Концентрация химических элементов в рассолах без циркуляции в сравнении с исходным раствором

Извлечение металлов при предварительной механохимической активации сухих хвостов

В связи с тем что механоактивация эффективно используется для превращения хвостов обогащения в вязущий компонент закладочного массива [42], было решено использовать эффект активации геоматериалов для повышения выхода свинца из хвостов. Геоматериалы были предварительно измельчены в лабораторной шаровой мельнице, пропущены через сито диаметром (отверстий) 4,0 мм и подвергались механоактивационному воздействию (сухим способом) в дезинтеграторе DESI-11. Скорость вращения ротора составляла 50 и 200 Гц. Программа экспериментальных работ включала в себя использование серной кислоты и хлорида натрия в различных пропорциях. Концентрация кислоты изменялась в диапазоне следующих значений 20, 90 и 160 г/л, а хлорида натрия при этом 2, 6 и 10 г/л. Подготовка жидкой фракции пульпы подразумевала предварительную подготовку химических реагентов (отдельные колбы) в пропорциях, указанных в методике проведения эксперимента. Все расчеты проводились для получения одного литра раствора для выщелачивания с выби-раемым соотношением твердой и жидкой фракций (S/L) = 1/4, 1/7 и 1/10 соответственно. После получения активированной твердой фракции геоматериала его смешивали с жидким раствором в указанном S/L соотношении фракций для образования пульпы. Затем проводили агитационное выщелачивание в лабораторных колоннах.

Массовая концентрация компонентов раствора для выщелачивания в итоговой пульпе, %, определялась по следующей формуле (на примере серной кислоты):

$$m_p(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{m_L(\text{H}_2\text{SO}_4)}{M_p} \times 100, \quad (5)$$

где M_p – масса пульпы, состоящая из массы раствора (меняющегося в зависимости от соотношения концентраций реагентов в 1 л) и постоянной массы навески твердых сухих отходов, равной 50 г; $m_L(\text{H}_2\text{SO}_4)$ – масса серной кислоты в жидкой фракции пульпы при разном содержании в ней кислоты и хлорида натрия, г.

Концентрацию свинца в пульпе определяли стандартным способом на атомно-абсорбционном спектрометре «KVANT-AFA» (ООО «КОРТЭК»). Построение Q-Q графиков (квантиль-квантиль графики – критерий «goodness-of-fit» качества построения моделей) осуществляли в ПО Microsoft Excel 2010. Результаты эффективности извлечения свинца при предварительной активации хвостов и времени выщелачивания 0,25 ч (вариант I), а также при предварительной активации хвостов сухим способом в дезинтеграторе и выщелачивании в течение 1 ч (вариант II) представлены в табл. 5 и на рис. 3.

Из анализа рис. 3, а следует, что активационное воздействие при $\nu = 50$ Гц и продолжительности выщелачивания 0,25 ч обуславливает рост продуктивности обогащения при $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0,8\text{--}0,9\%$ и $\text{NaCl} = 11,5\text{--}14\%$. Кроме того, прослеживается ярко выраженный второй максимум: $\text{Pb} = 28\%$ при $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0,32\text{--}0,45\%$ и $\text{NaCl} = 5\text{--}7,6\%$. Изменение времени выщелачивания с 0,25 до 1 ч и ν до 200 Гц приводит к росту абсолютных значений и площади второй зоны локального максимума, которая существенным образом меняет представление о процессе (рис. 3, б). При $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0,9\%$ рост доли NaCl с 1 до 14 % приводит к монотонному росту выхода свинца с 4 % до более чем 40 % ($\text{NaCl} = 13,5\%$). Площадь локального максимума ограничена областью от 0,5 до 0,7 % по H_2SO_4 и от 7 до 14 % по NaCl . Критерием goodness-of-fit для проверки качества четырех трехмерных моделей Q-Q служит график, приведенный на рис. 4.

Из анализа поверхностей отклика следует в целом согласованность полученных данных с результатами работ [43, 44] по обработке халькопиритов в мельнице тонкого измельчения, где рост концентрации H_2SO_4 был выше на 30 %. Выщелачивание Cu серной кислотой из руды [39] подтверждает увеличение продуктивности процесса с ростом числа оборотов ротора в дезинтеграторе с 50 до 200 Гц. В исследованиях [45, 46] также подтверждается эффективность применения DESI-15 для механоактивационного воздействия на геоматериалы.

Таблица 5

Эффект от предварительной механоактивации хвостов сухим способом

N эксперимента	$m_p(\text{H}_2\text{SO}_4)$, массовая концентрация кислоты в пульпе	$m_p(\text{NaCl})$, массовая концентрация хлорида натрия в пульпе	Варианты опытов	
	%	%	I	II
1	0,16	1,58	0,81	1,43
2	0,79	1,58	0,95	0,86
3	0,15	11,79	17,62	3,33
...	...	...	...	...
12	0,83	13,36	38,1	38,1
13	0,54	1,80	6,04	5,21
14	0,50	13,38	17,56	50,88

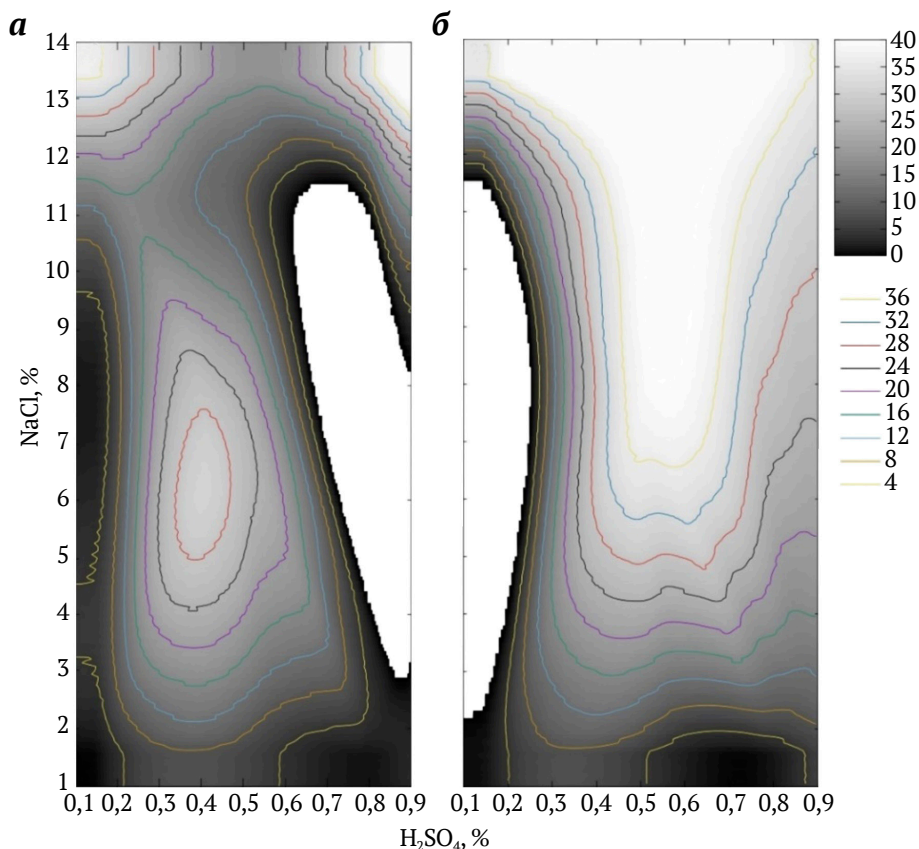


Рис. 3. Распределение выхода свинца из хвостов Мизурской фабрики:

а – выщелачивание Pb из предварительно активированных хвостов $\nu = 50$ Гц продолжительностью 0,25 ч (вариант II);
б – выщелачивание Pb из предварительно активированных хвостов $\nu = 200$ Гц продолжительностью 1 ч (вариант IV)

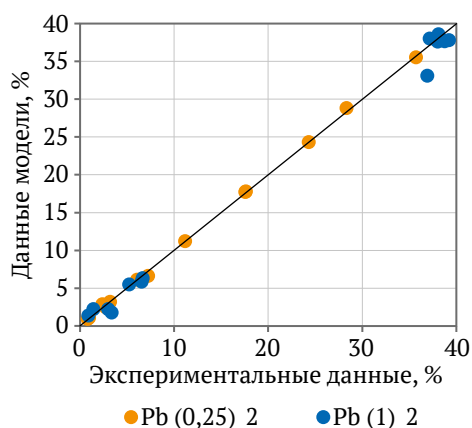


Рис. 4. Q–Q для двух вариантов моделей

Практическое применение

Значение полученных результатов заключается в возможности оптимизации технологической схемы электрохимического извлечения металлов из промышленных стоков на основании полученных закономерностей использования циркуляции рассолов через рассольные камеры. Кроме того, совокупность полученных результатов использования дезинтегратора для повторного извлечения свинца из геоматериалов позволит разработать методику расчета

параметров механоактивационного воздействия для повышения степени извлечения металлов из хвостов обогащения полиметаллического сырья РСО–Алания (Згидское, Садонское, Архонское месторождения).

Направления дальнейших исследований

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию параметров существующих геотехнологий не только в отношении экологизации отдельных компонентов или технологических процессов. В связи с этим наиболее перспективным направлением является обоснование путей использования подземного пространства для полного удаления отходов (промышленных стоков и хвостов обогащения) после их многостадийной обработки.

Заключение

Основным направлением трансформации парадигмы природопользования должно быть циркуляционное управление отходами при добыче полезных ископаемых. Спад горного производства с выходом из строя действующих богатых и удобных для эксплуатации месторождений может быть минимизирован при освоении технологии подземного выщелачивания с освоением некондиционных запасов. Предлагаемые рекомендации по совершенствованию подземного выщелачивания руд в блоках позво-



ляют определить оптимальные условия для повышения полноты использования недр и уменьшения ущерба окружающей среде.

Деградация окружающей среды жидкими продуктами выщелачивания руд при их добыче может быть минимизирована технологическими средствами. Для очистки рудничных стоков перспективен метод электродиализа и активации в диафрагменных электролизерах. При извлечении металлов с циркуляцией раствора через рассольные камеры содержания в дилуате с циркуляцией были низкими, а без циркуляции существенно превышали ПДК (для Na, Cl, SO₄ и Ca). Это доказывает принципиальную возможность управления процессами выщелачивания путем уси-

ления окислительного потенциала растворителей за счет добавления промышленных окислителей.

Хвостохранилища являются техногенными месторождениями, в пределах которых осуществляется естественное выщелачивание. Одним из ключевых результатов исследования является обоснование расширения области использования дезинтеграторов при направленном механо-химически-активационном воздействии. Рост продолжительности агитационного выщелачивания (как с использованием, так и без использования механоактивации) приводит к равномерному расширению локальных максимумов выхода Pb из пульпы при снижении минимальной концентрации NaCl с 11–12 до 7 % при H₂SO₄ = 0,6 %.

Список литературы / References

1. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015;157:306–324. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
2. Liang W., Wang J., Leung C., Goh S., Sang S. Opportunities and challenges for gas coproduction from coal measure gas reservoirs with coal-shale-tight sandstone layers: A review. *Deep Underground Science and Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1002/dug2.12077>
3. Январёв Г.С., Бобомуротов Б.Б. Объемная цифровая модель глубоких горизонтов главной рудной залежи Урупского медно-колчеданного месторождения. *Геология и геофизика Юга России*. 2023;13(1):125–135. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.90.90.009>
Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. Volumetric digital model of deep horizons of the Main ore deposit of the Urupsky copper-cruste deposit. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023;13(1):125–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.90.90.009>
4. Kukartsev V., Kozlova A., Kuimova O., Nelyub V., Gantimurov A. Using digital twins to create an inventory management system. *E3S Web of Conferences*. 2023;431:05016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343105016>
5. Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами. *Горный журнал*. 2022;(12):55–61. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>
Zakharov V.N., Kaplunov D.R., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Methodical approaches to standardization of data acquisition, storage and analysis in management of geotechnical systems. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(12):55–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>
6. Reddivari B.R., Vadapalli S., Sanduru B., Buddi T., Vafaeva K.M., Joshi A. Fabrication and mechanical properties of hybrid fibre-reinforced polymer hybrid composite with graphene nanoplatelets and multiwalled carbon nanotubes. *Cogent Engineering*. 2024;11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2343586>
7. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching technology current state, innovations, and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016;37(2):73–119. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
8. Панфилов И.А., Антамошкин О.А., Федорова Н.В., Дерюгин Ф.Ф., Бянкин В.Е. Профилактика загрязнения воздушной среды при открытой разработке рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):252–264. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_252
Panfilov I.A., Antamoshkin O.A., Fedorova N.V., Deryugin F.F., Byankin V.E. Prevention of air pollution during openpit mining of ore deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):252–264. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_252
9. Chaikin L., Shoppert A., Valeev D., et al. Concentration of rare earth elements (Sc, Y, La, Ce, Nd, Sm) in bauxite residue (red mud) obtained by water and alkali leaching of bauxite sintering dust. *Minerals*. 2020;10(6):500. <https://doi.org/10.3390/min10060500>
10. Евдокимов С.И., Макоева А.К., Макисмов Р.Н., Дятлова Д.И. Разработка метода и прибора для измерения сил в контактах частиц в условиях флотации микродисперсий золота. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(1):81–96. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-81-96>
Evdokimov S.I., Makoeva A.K., Maksimov R.N., Dyatlova D.I. Development of a method and apparatus for measuring the forces in particle contacts under conditions of flotation of gold microdispersions. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(1):81–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-81-96>
11. Shoppert A., Loginova I., Valeev D. Kinetics study of al extraction from desilicated coal fly ash by NaOH at atmospheric pressure. *Materials*. 2021;14:7700. <https://doi.org/10.3390/ma14247700>



12. Jiang H., Zhang H., Zhang X., Zhang J., Jiang Y. Experimental study on the influence of content and fineness of fly ash on the mechanical properties of grouting slurries. *Deep Underground Science and Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1002/dug2.12070>
13. 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;(1):52–55. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.10>
14. Chen T., Lei C., Yan B., Xiao X. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology. *Hydrometallurgy*. 2014;147–148:178–182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.018>
15. 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;331(11):30–36. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2883>
Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.M. Cementless backfill mixtures based on water-soluble manmade waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(11):30–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2883>
16. 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;61:40–57. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
17. Zhao H., Zhang Y., Zhang X., et al. The dissolution and passivation mechanism of chalcopyrite in bioleaching: An overview. *Minerals Engineering*. 2019;136:140–154. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.014>
18. Подрезов Д.Р. Задачи совершенствования управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):131–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
Podrezov D.R. Issues of improving control and increasing efficiency of production blocks at an ISL uranium mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):131–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
19. Гарифулина И.Ю., Абдулхалимов А.Г., Засеев И.А., Майстров Ю.А. Перспективы разработки Садонских месторождений подземным выщелачиванием. *Горные науки и технологии*. 2020;5(4):358–366. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-358-366>
Garifulina I.Y., Abdulkhalimov A.H., Zaseev I.A., Maystrov Y.A. Prospects for development of sadon deposits by in-situ leaching. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(4):358–366. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-358-366>
20. Джиоева А.К. Совершенствование технологии подземного выщелачивания при обеспечении экологически безопасной отработки рудных месторождений. *Безопасность труда в промышленности*. 2022;(9):62–68. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-9-62-68>
Dzhioeva A.K. Improvement of underground leaching technology while ensuring environmentally safe development of ore deposits. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2022;(9):62–68. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-9-62-68>
21. Feng X., Wang X. Characteristics of Electrical Resistance Alteration during in situ leaching of ion-adsorption-type rare earth ore. *Minerals*. 2024;14:92. <https://doi.org/10.3390/min14010092>
22. Wu Zh., Liao H., Lu K. Mining consensus sequence in multi-criteria group decision making with incomparability of alternatives and conflicts of experts. *Information Sciences*. 2022;610:359–380. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.07.058>
23. Deveci M., Gokasar I., Brito-Parada P.R. A comprehensive model for socially responsible rehabilitation of mining sites using Q-rung orthopair fuzzy sets and combinative distance-based assessment. *Expert Systems with Applications*. 2022;200:117155. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117155>
24. McManus S., Rahman A., Coombes J., Horta A. Uncertainty assessment of spatial domain models in early stage mining projects – A review. *Ore Geology Reviews*. 2021;133:104098. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104098>
25. Абас Висам Махди Абас, Арутюнян Р.В. Моделирование нелинейных динамических и стационарных систем на основе интегро-функциональных рядов Вольтерры и различных классов квадратурных формул. *Математическое моделирование и численные методы*. 2021;(2):68–85. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2021-2-6885>
Abas Wisam Mahdi Abas, Arutyunyan R.V. Modeling of nonlinear dynamic and stationary systems based on Volterra integro-functional series and various classes of quadrature formulas. *Mathematical Modeling and Computational Methods*. 2021;(2):68–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2021-2-6885>
26. Yan J., Xu M. Energy and circular economy in sustainability transitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;169:105471. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105471>
27. Shutaleva A. Ecological Culture and critical thinking: building of a sustainable future. *Sustainability*. 2023;15:13492. <https://doi.org/10.3390/su151813492>



28. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В., Стровский В.Е. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к экономике замкнутого цикла. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>
Ignatyeva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Strovsky V.E. Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>
29. Brigida V., Golik V.I., Voitovich E.V. et al. Technogenic reservoirs resources of mine methane when implementing the circular waste management concept. *Resources*. 2024;13(2):33. <https://doi.org/10.3390/resources13020033>
30. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management. *Resources, Conservation and Recycling Advances*. 2024;23:200224. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200224>
31. Ключев Р.В., Бригида В.С., Лобков К.Ю. и др. К вопросу мониторинга трещинообразования в природно-технических системах при сдвигении земной поверхности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11–1):292–304. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_292
Klyuev R.V., Brigida V.S., Lobkov K.Y. et al. On the issue of monitoring crack formation in natural-technical systems during earth surface displacements. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11–1):292–304. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_292
32. Ayaz A., Ozyurt O., Al-Rahmi W.M., et al. Exploring gamification research trends using topic modeling. In: *IEEE Access*. 2023;11:119676–119692. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3326444>
33. Klyuev R., Tekiev M., Silaev V., et al. Sustainable operation analysis of the mining industry power supply system. In: *E3S Web of Conferences*. 2021;326:00016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132600016>
34. Бригида В.С., Мишулина С.И., Стась Г.В. Перспективные направления экологизации структурных элементов туристского продукта краснодарского края (на примере транспортной составляющей). *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020;12(1):24–25. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25>
Brigida V.S., Mishulina S.I., Stas G.V. Perspective directions of “ecologisation” of structural elements of a tourist product of Krasnodar region (case study of transportation component). *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(1):24–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25>
35. Pavlov M.V., Vafaeva K.M., Karpov D.F. et al. Impact of environmental factors on indoor air temperature in gas-fired radiant heated cultivated structures. In: *E3S Web of Conferences. International Conference on “Advanced Materials for Green Chemistry and Sustainable Environment” (AMGSE-2024)*. 2024;511:01036. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451101036>
36. Vafaeva K.M., Karpov D.F., Pavlov M.V. et al. Analyzing thermal images to evaluate thermal protection in residential structures: lessons from russian practices. In: *E3S Web of Conferences. International Conference on “Advanced Materials for Green Chemistry and Sustainable Environment” (AMGSE-2024)*. 2024;511:01037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451101037>
37. Li G., Zhou Q., Zhu Z., et al. 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>
38. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённо-деформированное состояние массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2023;13(4):177–187. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>
Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*. 2023;13(4):177–187. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>
39. Кондратьев Ю.И., Выхребенц А.С., Бетров З.С., Дзеранова К.Б. Снижение энергозатрат на подземное электрохимическое выщелачивание металлов из руд. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2017;(4):419–426. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2017-9-4-419-426>
Kondratyev Yu.I., Vyskrebets A.S., Betrozov Z.C., Dzeranova K.B. Energy costs reduction on underground electrochemical metal leaching from ores. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2017;(4):419–426. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2017-9-4-419-426>
40. MacCarthy J., Nosrati A., Skinner W., Addai-Mensah J. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*. 2016;160:26–37. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.004>
41. 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>



42. Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Петров Д.Н. Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(2):349–364. <https://doi.org/10.17073/10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364>
Kovalski E., Kongar-Syuryun C., Petrov D. Challenges and prospects for several-stage stoping in potash minining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):349–364. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364>
43. Palaniandy S. Impact of mechanochemical effect on chalcopryrite leaching. *International Journal of Mineral Processing*. 2015;136:56–65. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.10.005>
44. Minagawa M., Hisatomi Sh., 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.appt.2017.11.031>
45. Bumanisa G., Bajarea D. Compressive strength of cement mortar affected by sand micro filler obtained with collision milling in disintegrator. *Procedia Engineering*. 2017;172:149–156. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.037>
46. Basturkcü H., Achimovicova M., Kanuchova M., Acarkan N. Mechanochemical pre-treatment of lateritic nickel ore with sulfur followed by atmospheric leaching. *Hydrometallurgy*. 2018;181:43–52. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.08.016>

Информация об авторах

Владимир Иванович Голик – доктор технических наук, профессор кафедры техники и технологии горного и нефтегазового производства, Московский политехнический университет (МПУ), г. Москва, Российская Федерация; профессор кафедры горного дела, Северо-Кавказского горно-металлургического института (СКГТИ), г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1181-8452](https://orcid.org/0000-0002-1181-8452), Scopus ID [6602135324](https://orcid.org/6602135324); e-mail v.i.golik@mail.ru

Юрий Иванович Разоренов – доктор технических наук, профессор, ректор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8171-0749](https://orcid.org/0000-0001-8171-0749), Scopus ID [57194146509](https://orcid.org/57194146509); e-mail rektorat@npi-tu.ru

Нияз Гадым оглы Валиев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горного дела, Уральский государственный горный университет (УГТУ), г. Екатеринбург, Россия; ORCID [0000-0002-5556-2217](https://orcid.org/0000-0002-5556-2217), Scopus ID [55749527900](https://orcid.org/55749527900); e-mail science@ursmu.ru

Оксана Александровна Гаврина – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории управления горнотехническими системами, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9712-9075](https://orcid.org/0000-0002-9712-9075), Scopus ID [57204639532](https://orcid.org/57204639532)

Information about the authors

Vladimir I. Golik – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Technique and Technology of Mining and Oil and Gas Production Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; Professor of Mining Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1181-8452](https://orcid.org/0000-0002-1181-8452), Scopus ID [6602135324](https://orcid.org/6602135324); e-mail v.i.golik@mail.ru

Yuri I. Razorenov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of Platov South-Russian State Polytechnic University NPI, Novocherkassk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8171-0749](https://orcid.org/0000-0001-8171-0749), Scopus ID [57194146509](https://orcid.org/57194146509); e-mail rektorat@npi-tu.ru

Niyaz G. Valiev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mining, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5556-2217](https://orcid.org/0000-0002-5556-2217), Scopus ID [55749527900](https://orcid.org/55749527900); e-mail science@ursmu.ru

Oksana A. Gavrina – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Mining Systems Control Laboratory, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9712-9075](https://orcid.org/0000-0002-9712-9075), Scopus ID [57204639532](https://orcid.org/57204639532)

Поступила в редакцию 24.11.2023
Поступила после рецензирования 29.01.2024
Принята к публикации 01.02.2024

Received 24.11.2023
Revised 29.01.2024
Accepted 01.02.2024