

МЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТОВ ТВЕРДЕЮЩИХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ

В.И. Голик¹, И.А. Алексеев²

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

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), Владикавказ, РСО-Алания, Россия

Аннотация: Тема исследования – механохимическая активация хвостов обогащения руд для утилизации в горном производстве в качестве компонентов твердеющих закладочных смесей. Проблемы объекта – ограничение возможности утилизации хвостов обогащения и металлургического переделов при наличии в них металлов, превышающих допустимые пределы, определяет цель исследования: научное и экспериментальное обоснование возможности использования хвостов после извлечения металлов до уровня санитарных норм для целей погашения выработанного пространства. Методы исследования включают в себя обобщение и систематизацию опыта выщелачивания металлов из хвостов обогащения в дезинтеграторах. Увеличение объемов производства металлов актуализирует проблему поиска резервов горного производства, в том числе, увеличение доли технологий с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Показано, что одним из путей решения сырьевой проблемы является освоение механохимической технологии переработки некондиционного минерального сырья с улучшением качества малоактивных доступных и дешевых ингредиентов смесей комбинированным механическим и химическим воздействием. Установлено, что извлечение металлов при выщелачивании в дезинтеграторе достигает величины, при которой хвосты обогащения могут использоваться в горной промышленности без ограничения по санитарным условиям, в том числе в качестве вяжущих компонент. Механохимическая технология переработки хвостов увеличивает область применения технологий с закладкой техногенных пустот твердеющими смесями на основе хвостов переработки. Поэтому метод глубокой утилизации хвостов горно-металлургического производства с использованием механохимической активации в дезинтеграторе является реальным резервом совершенствования разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом.

Ключевые слова: выработанное пространство, твердеющая смесь, хвосты обогащения, металл, механохимия, энергия, активация.

Для цитирования: Голик В. И., Алексеев И. А. Механохимическая активация хвостов обогащения для использования в качестве компонентов твердеющих закладочных смесей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5-1. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_5.

Mechanochemical activation of processing tailings to manufacture components for cemented backfill

V.I. Golik¹, I.A. Alekseev²

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, e-mail: v.i.golik@mail.ru

² North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract: The topic of this research is the mechanochemical activation of ore processing tailings to be used in production of components for cemented backfill. The problem here is the limited usability of processing and conversion tailings at their content of metals higher than the allowable maximum. This fact defines the goal of the research: the theoretical and experimental validation of usability of tailings after removal of metal impurities down to the sanitary standards for the purposes of backfilling. The research methods include the generalization and systematization of the experience of metal leaching from processing tailings in disintegrators. The increased volume of metal production calls for new resources from mining practices, including increased application of mining technologies with cemented backfill. It is shown that one of the ways of solving the problem connected with shortage of raw materials is mechanochemical processing of low-grade minerals with improvement of qualities of available cheap agents by integration of the mechanical and chemical effects. Recovery of metals in leaching in a disintegrator reaches the value which allows using the tailings in the mining industry without the health-based constraints, including production of binding agents. The mechanochemical technology of tailings treatment allows expanding the range of backfilling with cemented backfill made of tailings. For this reason, the comprehensive utilization of mining and metallurgy waste after mechanochemical activation in disintegrators can be a realistic reserve for the improvements and achievements in underground mineral mining.

Key words: mined-out space, cemented mixture, tailings, metal, mechanochemistry, energy, activation.

For citation: Golik V. I., Alekseev I. A. Mechanochemical activation of processing tailings to manufacture components for cemented backfill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5-1):5-16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_5.

Введение

Демографическая ситуация и повышение спроса на металлическое сырье объясняют необходимость увеличения объемов производства металлов для удовлетворения потребности человечества и актуализирует поиски резервов горного производства.

Одним из приоритетных направлений развития горного производства является освоение природо- и ресурсосберегающих технологий, затрагивающих

геомеханическую и аэрологическую безопасность [1 – 3], в том числе технологий с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями [4]. Препятствием для использования в составе смесей хвостов обогащения является наличие в них не извлеченных при обогащении и металлургии металлов. Одним из путей решения сырьевой проблемы является освоение механо-химической технологии переработки некондиционного минерального сырья с улучшением

свойств малоактивных доступных и дешевых ингредиентов смесей энергетическим и химическим воздействием.

Принципы диспергирования веществ установили Риттингер и Кикк в 1867 и 1885 гг. У истоков сравнительно новой концепции — изменения состояния вещества с получением нового качества: активации при скорости удара 250 м/с — стоит эстонский ученый И. Хинт.

Новейшая история горного дела — борьба за приоритет двух концепций:

- валовая выемка с высокой производительностью и снижением качества руд, компенсируемым обогащением;
- селективная добыча с повышенным качеством, но с ограниченной производительностью.

Превалирует первая концепция, однако технологии обогащения не компенсируют снижения качества, и увеличение запасов хвостов в хранилищах превратилось в глобальную экологическую проблему. Шагом к безотходной утилизации металлосодержащих хвостов являются технологии с выщелачиванием металлов, однако для их осуществления необходимо продолжительное время (месяцы), а сам процесс выщелачивания трудно контролируется и корректируется.

Получающаяся развитие механохимическая технология переработки хвостов отличается тем, что в рабочей камере дезинтегратора процессы извлечения металлов ускоряются за счет энергии, возникающей от ударов частиц при увеличенной скорости вращения роторов. Основные реагенты для выщелачивания не вырабатываются из участвующих в процессе минералов, а подаются в рабочий орган. Выщелачивающие растворы не фильтруются в трещины, а запрессовываются в них, поэтому извлечение металлов происходит одновременно с разрушением кристаллов.

Реагенты-окислители переводят в раствор практически содержащиеся в хво-

стах металлы существенно быстрее, чем при традиционном агитационном выщелачивании. Новая технология позволяет извлекать из хвостов обогащения практически все металлы, поэтому вторичные хвосты могут быть использованы без ограничений.

Принцип дезинтеграции известен полтора столетия, феномен выщелачивания получил развитие начиная с середины прошлого века, а идея выщелачивания в дезинтеграторе получает известность лишь в последние годы.

Актуальность проблемы неуклонно повышается еще и потому, в горнодобывающей отрасли расширяется применение природоохранных технологий с закладкой техногенных пустот твердеющими смесями, для которых хвосты переработки являются сырьем. В качестве инертных заполнителей используются добываемые природные материалы — песчано-гравийная смесь и т.п., что приводит к нарушению верхнего слоя литосферы. Поэтому актуализировалось направление глубокой утилизации хвостов горно-металлургического производства, в том числе выщелачиванием в дезинтеграторе.

Концепция конверсии горного производства включает принципы комбинирования физико-технических и физико-химических геотехнологий разработки рудных месторождений [5, 6].

В рамках этой концепции комбинирования технологий разработки рудных месторождений развивается направление «механохимическая технология извлечения металлов из хвостов обогащения» [7, 8] с обоснованием технической возможности и экономической целесообразности утилизации горнопромышленных отходов [9].

При определении путей расширения границ применения эффективных технологий рассматривается возможность использования приобретаемых металла-

ми качеств в смежных отраслях — потребителях [10, 11].

Детализируется теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы с целью управления их качеством в рамках горного производства [12].

Вопросы горного производства переходят на новый уровень, например, использование систем искусственного интеллекта в процедурах аудита с применением мультиагентных систем [13, 14].

В ряде работ озвучиваются принципы устойчивого развития горнотехнических систем в настоящее время [15, 16].

При решении пространственно-временных задач геотехнологии преобладает междисциплинарный подход [17].

Расширяются горизонты использования свойств пород и слагаемых ими массивов при определении параметров разработки рудных месторождений [17, 18].

На новый уровень вышло направление утилизации отходов добычи и переработки руд как элемент безотходного производства металлов [19], а также концепции упрочнения минерально-сырьевой базы цветной металлургии [20, 21].

Методы

Одной из причин отставания науки и практики в этом важном направлении является недостаточность развития ме-

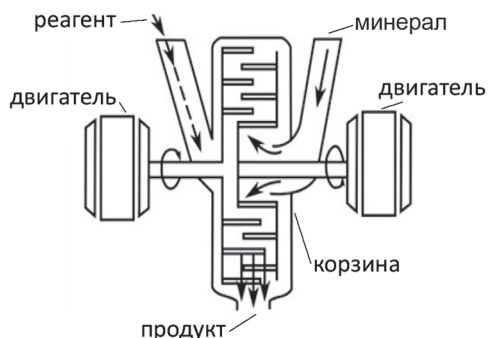


Рис. 1. Схема дезинтегратора

Fig. 1. Disintegrator circuit

тодов исследования материалов с целью направленного управления ими [22].

На предприятиях добывающих отраслей накоплены отходы производства [22], которые по химико-минералогическому составу близки к сырью, используемому для приготовления твердеющих смесей. Такие техногенные материалы уступают стандартным материалам по активности или скорости вступления в реакцию.

Активность материалов увеличивается не только за счет удельной поверхности при обработке, но и за счет увеличения дефектности кристаллической решетки при обработке в дезинтеграторе.

Обработка в дезинтеграторе обеспечивает прирост удельной поверхности материалов на 35–150%. Гидравлическую активность приобретают считавшиеся ранее инертными хвосты обогащения руд.

В промышленности используют материалы, измельченные до удельной поверхности — 600–4000 см²/г и размеров частиц до 10 мкм. Продукты горнорудной промышленности представляют собой малоактивные в химическом отношении вещества. Для применения их в качестве вяжущих необходимо их тонкое диспергирование, многокомпонентное смешение и повышение химической активности.

Такие процессы моделируются в дезинтеграторной установке ДЕЗ-11, предназначенной для измельчения материалов твердостью до 5 ед. по Моосу (рис. 1).

Экспериментальные исследования основаны на сравнении показателей прочности смесей при базовом способе и при выщелачивании хвостов с различными режимами обработки, в том числе:

- в агитаторе;
- в агитаторе после активации в дезинтеграторе без реагентов;
- в дезинтеграторе с реагентами;
- в агитаторе после активации в дезинтеграторе с реагентами в одну стадию;

- в агитаторе после механоактивации в дезинтеграторе в несколько стадий.

Регулируемые при осуществлении экспериментов факторы:

- содержание в растворе серной кислоты и хлорида натрия;
- соотношение жидкой и твердой фаз (Ж:Т);
- время агитационного выщелачивания;
- скорость вращения роторов дезинтегратора;
- количество циклов обработки.

Критерием эффективности исследуемых вариантов является извлечение металлов и прочность образцов твердеющих смесей, изготовленных на основе хвостов обогащения: хвосты обогащения с различными параметрами активации — 1445 кг/м³, вода — 380 кг/м³, цемент — в зависимости от условий исследования. Выщелачивали 50 г хвостов крупностью до 2 мм. Влияющие на извлечение металлов факторы исследовали на трех уровнях — минимальном, нулевом и максимальном.

Таблица 1

Прочность твердеющих смесей без активации
Strength of hardening mixtures without activation

Расход портландцемента, кг/м ³	30	60	80	100	120	180
Прочность, МПа	0,79	0,92	0,101	1,20	1,41	1,80

Таблица 2

Прочность смесей с вяжущим цементом в зависимости от активации хвостов
The strength of mixtures with astringent cement depending on the activation of the tails

Способ переработки	Прочность смеси, МПа, сутки		
	7	14	28
Без активации с расходом портландцемента 100 кг/м ³	1,04	1,11	1,20
Механическая активация без реагентов	1,16	1,25	1,32
Агитационное выщелачивание без активации	0,52	0,61	0,72
Механическая активация без реагентов с выщелачиванием в агитаторе	0,68	0,73	0,88
Механохимическая активация в дезинтеграторе	0,73	0,77	0,94
Трехкратная механохимическая активация в дезинтеграторе	0,92	1,10	1,22

1. Содержание серной кислоты и хлорида натрия, X1, X2: X1 — 2, 6 и 10 г/л, X2 — 20, 90 и 160 г/л.

2. Соотношение Ж:Т, X3: X3 — 4, 7 и 10.

3. Время агитационного выщелачивания, X4: X4 — 0,25; 0,625 и 1 ч, кроме экспериментов 3-го и 5-го этапов.

4. Частота вращения роторов, X5: X5 — 50, 125 и 200 Гц, кроме этапа 1.

5. Количество циклов обработки в дезинтеграторе, X6: X6 — 3, 5, 7 (для этапа 5).

Полученные результаты

Экспериментальная переработка хвостов обогащения имела следующие цели:

- активация минерального сырья для улучшения качества изделий из них;
- активация хвостов переработки для извлечения металлов.

Состав хвостов обогащения, %: Zn — 0,95; Pb — 0,84; Fe — 4,4; S — 1,88; SiO₂ — 31,4; CaO — 1,96; Mn — 0,015; K₂O — 3,5; Al₂O₃ — 0,8; TiO₂ — 0,03; Ag — 0,01519; Cu — 0,185.

Таблица 3

Влияние активации на прочность смесей без вяжущего цемента
The effect of activation on the strength of mixtures without astringent cement

Способ переработки	Прочность смеси, МПа, сутки		
	7	14	28
Без активации	0,64	0,81	1,01
Механическая активация без реагентов	0,86	0,95	1,12
Агитационное выщелачивание без активации	0,42	0,57	0,62
Механическая активация с агитационным выщелачиванием	0,60	0,69	0,78
Механохимическая активация в дезинтеграторе	0,63	0,71	0,84
Трехкратная механохимическая активация в дезинтеграторе	0,82	1,00	1,12

Прочность твердеющих смесей, изготовляемых по базовой технологии без извлечения из хвостов металлов и механической активации, монотонно изменяется в зависимости от количества вяжущего цемента (табл. 1).

Механическая активация хвостов в дезинтеграторе повышает прочность твердеющей смеси (табл. 2), хотя выщелачивание в дезинтеграторе уменьшает прочность твердеющей смеси за счет увеличения влажности.

Определено, что трехкратная механохимическая активация хвостов обогащения в дезинтеграторе обеспечивает прочность смеси на уровне базовой с

расходом цемента 100 кг/м³. Только механическая активация хвостов в дезинтеграторе увеличивает прочность смесей без вяжущего цемента на 10% (табл. 3).

Установлено, что наибольшей прочностью обладают твердеющие смеси на основе механоактивированных в дезинтеграторе хвостов с добавкой цемента (рис. 2, 3).

При всех режимах выщелачивания прочность при однократной обработке снижается, что компенсируется кратностью переработки (табл. 4).

Коэффициент усиления прочности твердеющих смесей с активированными компонентами оценивается в 0,2–0,3.

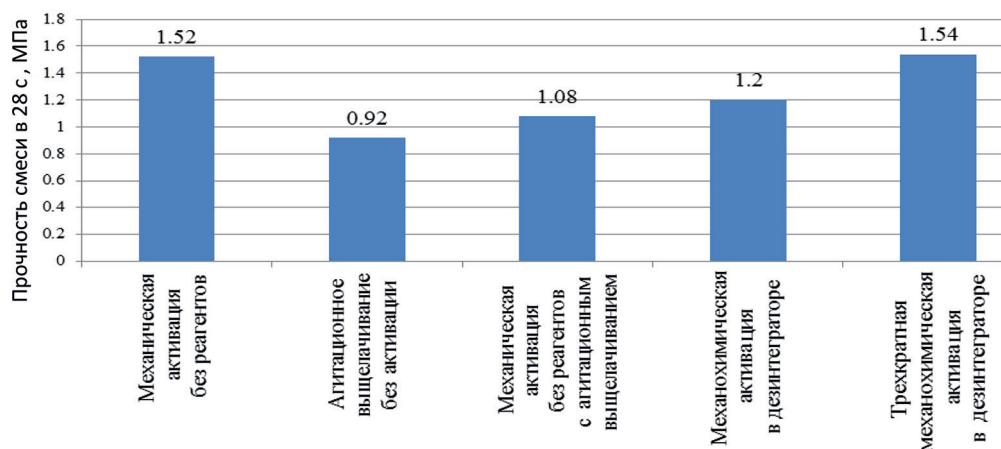


Рис. 2. Прочность твердеющих смесей с добавкой цемента

Fig. 2. Strength of hardening mixtures with the addition of cement

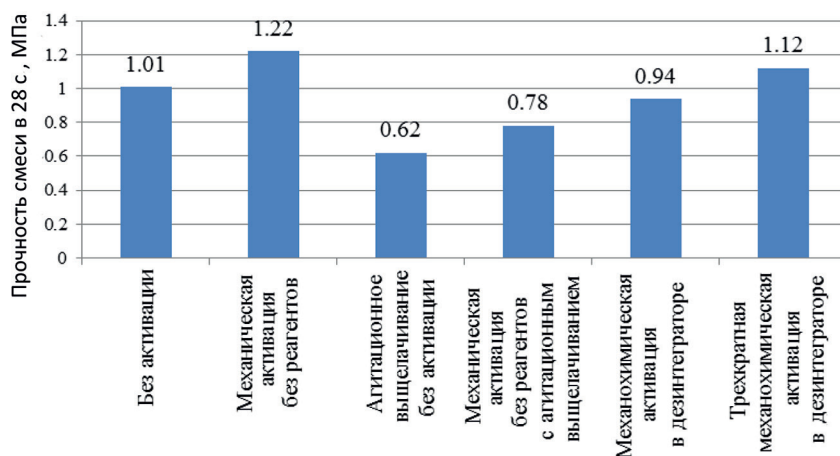


Рис. 3. Прочность твердеющих смесей без цемента
Fig. 3. Strength of hardening mixtures without cement

Таблица 4

Влияние активации на прочность твердеющих смесей
The effect of activation on the strength of hardening mixtures

Вид активации	Прочность смеси, 28 с, МПа		
	цемент 100 кг/м ³		без цемента
	без активации	с активацией	
Без активации	1,30	—	1,01
Механическая активация	—	1,52	1,22
Агитационное выщелачивание	—	0,92	0,62
Механическая активация с последующим агитационным выщелачиванием	—	1,08	0,78
Механохимическая активация в дезинтеграторе	—	1,20	0,94
Трехкратная механохимическая активация в дезинтеграторе	—	1,54	1,12

Обсуждение результатов

Элементом комбинированной технологии является использование хвостов обогащения в качестве сырья. Принципиальным условием для этого является извлечение из них металлов до требований санитарных норм.

Отходы первого этапа разработки месторождений утилизируются с привлечением методов гидрометаллургической и химической переработки, в том числе механической активации вещества большой энергией в присутствии химических

реагентов. Для извлечения металлов из материалов, измельченных при первичной отработке, используют выщелачивание с активацией в специальных аппаратах: дезинтеграторах, мельницах и т.п.

Извлечение металлов в раствор при механоактивации сырья характеризуется данными, %:

- полиметаллические руды Садонского узла: свинец 13...34, цинк 10... 69;
- железистые кварциты Лебединского месторождения: железо 10— 25 и более при увеличении циклов перера-

ботки, медь $3,8... 4,3 \times 10^{-3}$, никель $2,9... 3,5 \times 10^{-3}$, цинк $3,2 - 4,2 \times 10^{-4}$ и др.

Совмещение механического и химического процессов в дезинтеграторе по сравнению с вариантом раздельной активации и выщелачивания увеличивает извлечение на величину в первые проценты, а время продолжительность агитационного выщелачивания изменяется от 15 до 60 мин, или на 2 порядка уменьшается.

В раствор извлекаются все металлы, что позволяет использовать вторичные хвосты без санитарных ограничений. В продуктах дезинтегратора сравнительно мала фракция частиц более 125 и менее 5 мкм.

В случае применения комплексных вяжущих: цемент + хвосты, при равных условиях активация в дезинтеграторе эффективнее, чем в шаровой мельнице.

При обработке 1 кг сухих хвостов (влажность 2,0%) с частицами менее 2,0 мм, подаче материала со скоростью 10 кг/ч и частоте вращения роторов дезинтегратора 200 Гц получен порошок с 93%-ным содержанием фракции $-0,1$ мм. Ток двигателя вращения ротора составлял 8,5 А, температура хвостов увеличилась на 32 °С.

При обработке 1 кг руды влажность 2,0 предварительно измельченной на мельнице динамического самоизмельчения до крупности менее 2,0 мм, подаче материала со скоростью 10 кг/ч и частоте вращения роторов дезинтегратора 200 Гц получен порошок с 95,3%-ным содержанием фракции $-0,1$ мм. Ток двигателя вращения ротора составлял 9,2 А, температура хвостов увеличилась на 37 °С.

При обработке 1 кг пульпы, полученной добавлением к 0,2 кг хвостов с частицами менее 2,0 мм 1,0 л выщелачивающего раствора хлорида натрия 100 г/л и серной кислоты 6 г/л, подаче пульпы со скоростью 10 кг/ч и частоте враще-

ния роторов дезинтегратора 200 Гц получен порошок с 92,7%-ным содержанием фракции $-0,1$ мм. Ток двигателя вращения ротора составлял 8,1 А, температура пульпы увеличилась на 22 °С.

При обработке 1 кг пульпы, полученной добавлением к 0,2 кг руды с частицами менее 2,0 мм 1,0 л выщелачивающего раствора с содержанием хлорида натрия 100 г/л и серной кислоты 6 г/л, подаче пульпы со скоростью 10 кг/час и частоте вращения роторов дезинтегратора 200 Гц получен (после фильтрации и сушки) порошок с 92,1%-ным содержанием фракции $-0,1$ мм. Ток двигателя вращения ротора составлял 8,3 А, температура пульпы увеличилась на 26 °С.

Технология позволяет получать из хвостов обогащения товарные продукты: концентраты; кварцевый флюс; кварцевый и кварцево-полевошпатный песок; иловую фракцию и др.

Эффективность технологии складывается из следующих факторов:

- используется новый вид энергетического воздействия — активация;
- при комбинировании технологий возникает синергетический эффект;
- извлечение всех металлов до фоновых значений;
- возможность ликвидации хранилищ хвостов.

Реализация механохимического выщелачивания открывает перспективы радикального оздоровления окружающей среды, поскольку ликвидируется источник химического загрязнения — хвосты переработки руд.

Результаты исследования совпадают с выводами зарубежных исследователей или подтверждаются ими [23, 24].

Выводы

Механическая активация хвостов в дезинтеграторе повышает прочность твердеющей смеси за счет прироста удельной поверхности материалов на 35—150%.

Трехкратная механохимическая активация хвостов обогащения обеспечивает прочность смеси на уровне базовой с расходом цемента 100 кг/м³. Только механическая активация хвостов в дезинтеграторе увеличивает прочность смеси без вяжущего цемента на 10%.

Коэффициент усиления прочности твердеющих смесей с активированными

компонентами оценивается в 0,2–0,3. Совмещение механического и химического процессов в дезинтеграторе по сравнению с вариантом отдельной активации и выщелачивания увеличивает извлечение на величину в первые проценты, а продолжительность агитационного выщелачивания изменяется от 15 до 60 мин, или на 2 порядка уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 276–285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

2. Босиков И. И., Ключев Р. В., Майер А. В., Стась Г. В. Разработка метода анализа и оценки оптимального состояния аэрогазодинамических процессов на угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 97–106. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.

3. Босиков И. И., Ключев Р. В., Аймбетова И. О., Махошева С. А. Оценка и анализ аэродинамических параметров воздушных потоков для эффективного выбора схем воздухообеспечения в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. – № 3. – С. 397–405. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405.

4. Куликова А. А., Ковалева А. М. Применение хвостов обогащения в качестве закладки выработанного пространства рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2-1. – С. 144–154. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-144-154.

5. Хинт И. А. О четвертом компоненте технологии. Научно-информационный сборник СКТБ «Дезинтегратор». – Таллин: Валгус, 1980. – С. 66–72.

6. Голик В. И. Концептуальные подходы к созданию мало- и безотходного горнорудного производства на основе комбинирования физико-технических и физико-химических геотехнологий // Горный журнал. – 2013. – № 5. – С. 93–97.

7. Голик В. И., Дмитрак Ю. В., Разоренов Ю. И., Масленников С. А., Ляшенко В. И. Механо-химическая технология извлечения железа из хвостов обогащения // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 282–291. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-4-282-291.

8. Голик В. И., Комащенко В. И., Качурин Н. М. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 76–88.

9. Комащенко В. И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 23–30.

10. Еремеева Ж. В., Шарипзянова Г. Х. Состав диффузионных слоев и влияние типа активатора на структуру получаемых при диффузионном хромосилицировании порошковых материалов // Технология металлов. – 2007. – № 7. – С. 35–37.

11. Ключев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – Т. 12. – № 2. – С. 283–290. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290.

12. Бунин И. Ж., Рязанцева М. В., Самусев А. Л., Хабарова И. А. Теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на гео-

материалы и водные суспензии // Горный журнал. — 2017. — № 11. — С. 134–139. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.14.

13. Валиев Н. Г., Головырин С. С., Макаров В. В. К вопросу об использовании систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства (проблематика решения задач современного горного производства с использованием мультиагентных систем) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 523. — С. 134–139. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-134-139.

14. Малыхина М. П., Герасимов Д. А. Мультиагентные системы искусственного интеллекта // Научные труды КубГТУ. — 2018. — № 3. — С. 476–484.

15. Бурмистров К. В., Осинцев Н. А. Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 4. — С. 179–195. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2606.

16. Sepehri M., Apel D. B., Adeeb S., Leveille P., Hall R. A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model // Engineering Geology. 2020, vol. 266, pp. 105–117. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105457.

17. Бригада В. С., Кожиев Х. Х., Сарян А. А., Джиоева А. К. Пространственно-временные задачи геоэкологии — междисциплинарный подход // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 4. — С. 20–32. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-20-32.

18. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Dzeranov B. V., Morozov F. S., Tuaeв G. E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center // International Journal of Geomate. 2018, vol. 15, no. 47, pp. 158–163. DOI: 10.21660/2018.47.20218.

19. Rybak J., Gorbatyuk S., Bujanovna-Syuryun K., Khairutdinov A., Tyulyaeva Y., Makarov P. Utilization of mineral waste: a method for expanding the mineral resource base of a mining and smelting company // Metallurgist. 2021, vol. 64, pp. 851–861. DOI: 10.1007/s11015-021-01065-5.

20. Дмитрак Ю. В., Цидаев Б. С., Дзапаров В. Х., Харебов Г. Х. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России // Вектор ГеоНаук. — 2019. — Т. 2. — № 1. — С. 9–18. DOI: 10.24411/2619-0761-2019-10002.

21. Петров Ю. С., Хадзарагова Е. А., Соколов А. А., Шарипзянова Г. Х., Таскин А. В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах технологического цикла горно-металлургического предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 11-1. — С. 178–188. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-178-188.

22. Михайлов В. Г., Хорешок А. А., Кошелев А. В. Система управления отходами промышленного предприятия как элемент экологического стандарта угледобывающего региона // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 379–390. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-379-390.

23. 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, vol. 37, no. 2, pp. 73–119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.

24. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. 2015, vol. 157, pp. 306–324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022. **ПИАБ**

REFERENCES

1. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Hierarchical structure of aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 276–285. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

2. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Mayer A. V., Stas G. V. Development of a method for analyzing and evaluating the optimal state of aerogasodynamic processes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 97 – 106. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.
3. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Aimbetova I. O., Makhosheva S. A. Assessment and analysis of aerodynamic parameters of air flows for effective selection of air supply schemes in coal mine. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 3, pp. 397 – 405. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405.
4. Kulikova A. A., Kovaleva A. M. Use of tailings of enrichment for laying of the developed space of mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 144 – 154. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-144-154.
5. Khint I. A. *O chetvertom komponente tekhnologii. Nauchno-informatsionnyy sbornik SKTB «Dezintegrator»* [About the fourth component of the technology. Scientific and informational collection of SCTB «Disintegrator»], Tallin, Valgus, 1980, pp. 66 – 72.
6. Golik V. I. Conceptual approaches to the creation of low waste and wasteless mining production on the basis of combination of physical-technical and physical-chemical geotechnologies. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no. 5, pp. 93 – 97. [In Russ].
7. Golik V. I., Dmitrak Yu. V., Razorenov Yu. I., Maslennikov S. A., Lyashenko V. I. Mechanochemical technology of iron extraction from enrichment tailings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 282 – 291. [In Russ]. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-4-282-291.
8. Golik V. I., Komashchenko V. I., Kachurin N. M. The concept of combining technologies for the development of ore deposits. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2015, no. 4, pp. 76 – 88. [In Russ].
9. Komashchenko V. I. Ecological and economic feasibility of utilization of mining waste for the purpose of their processing. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2015, no. 4, pp. 23 – 30. [In Russ].
10. Ereemeva Zh. V., Sharipzyanova G. X. The composition of diffusion layers and the effect of the activator type on the structure of powder materials obtained during diffusion chromosilidation. *Tekhnologiya metallov*. 2007, no. 7, pp. 35 – 37. [In Russ].
11. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Mayer A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, vol. 12, no. 2, pp. 283 – 290. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290.
12. Bunin I. Zh., Ryazantseva M. V., Samusev A. L., Khabarovsk I. A. Composite physicochemical and energy action on geomaterials and aqueous slurries: theory and practice. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 11, pp. 134 – 139. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.14.
13. Valiev N. G., Golovyryn S. S., Makarov V. V. On the use of artificial intelligence systems in audit procedures of modern mining production (problems of solving problems of modern mining production using multi-agent systems). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. S23, pp. 134 – 139. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-134-139.
14. Malykhina M. P., Gerasimov D. A. Multi-agent systems artificial intelligence. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2018, no. 3, pp. 476 – 484. [In Russ].
15. Burmistrov K. V., Ositsev N. A. Principles of sustainable development of mining and technical systems in transitional periods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 4, pp. 179 – 195. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2606.
16. Sepehri M., Apel D. B., Adeeb S., Leveille P., Hall R. A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. *Engineering Geology*. 2020, vol. 266, pp. 105 – 117. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105457.
17. Brigida V. S., Kozhiev Kh. Kh., Saryan A. A., Dzhoieva A. K. Time-space problems in geocology: An inter-disciplinary approach. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 4, pp. 20 – 32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-20-32.

18. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Dzeranov B. V., Morozov F. S., Tuaeov G. E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. *International Journal of Geomate*. 2018, vol. 15, no. 47, pp. 158–163. DOI: 10.21660/2018.47.20218.

19. Rybak J., Gorbatyuk S., Bujanovna-Syuryun K., Khairutdinov A., Tyulyaeva Y., Makarov P. Utilization of mineral waste: a method for expanding the mineral resource base of a mining and smelting company. *Metallurgist*. 2021, vol. 64, pp. 851–861. DOI: 10.1007/s11015-021-01065-5.

20. Dmitrak Yu. V., Tsidaev B. S., Dzaparov V. Kh., Kharebov G. H. Mineral resource base of non-ferrous metallurgy of Russia. *Vector of Geosciences*. 2019, vol. 2, no. 1, pp. 9–18. [In Russ]. DOI: 10.24411/2619-0761-2019-10002.

21. Petrov Yu. S., Khadzaragova E. A., Sokolov A. A., Sharipzyanova G. Kh., Taskin A. V. Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy: Outlines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11-1, pp. 178–188. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-178-188.

22. Mikhailov V. G., Khoreshok A. A., Koshelev A. V. Waste management system of an industrial enterprise as an element of the ecological standard of the coal mining region. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 379–390. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-379-390.

23. 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, vol. 37, no. 2, pp. 73–119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.

24. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015, vol. 157, pp. 306–324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голик Владимир Иванович — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: v.i.golik@mail.ru,
Московский политехнический университет,
Алексеев Игорь Александрович — канд. юрид. наук,
доцент, профессор, ректор, Северо-Кавказский
горно-металлургический институт
(государственный технологический университет).
Для контактов: Голик В.И., e-mail: v.i.golik@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.I. Golik, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: v.i.golik@mail.ru,
Moscow Polytechnic University,
107023, Moscow, Russia,
I.A. Alekseev, Cand. Sci. (Jurid.),
Assistant Professor, Professor, Rector,
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University),
362021, Vladikavkaz, Russia.
Corresponding author: V.I. Golik, e-mail: v.i.golik@mail.ru.

Получена редакцией 13.01.2023; получена после рецензии 13.02.2023; принята к печати 10.04.2023.
Received by the editors 13.01.2023; received after the review 13.02.2023; accepted for printing 10.04.2023.