

К КОНЦЕПЦИИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ

Т.А. Панфилова¹, В.С. Тынченко^{1,2,3}, В.А. Кукарцев¹, К.А. Башмур¹, В.В. Кондратьев⁴

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, e-mail: tranfilova@sfu-kras.ru

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,
Красноярск, Россия,

⁴ Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Рост потребления металлосодержащего сырья, климатические изменения, исчерпаемость запасов угля в комфортных для добычи регионах делают актуальной необходимость модернизации технологий добычи металлов. Полнота использования запасов повышается при выщелачивании металлов из хвостов обогащения металлических руд в дезинтеграторе. Анализ возможностей этой технологии производится по результатам анализа передового опыта и моделирования параметров. Научная новизна предлагаемого решения состоит в развитии основ технологических процессов переработки некондиционного сырья с использованием новых технологий извлечения металлов. Установление системных связей и закономерностей позволяет систематизировать и формализовать принципы моделирования процессов извлечения металлов при дифференцированной оценке постоянных и переменных факторов. Появляется возможность разработать модели управления данным участком горного производства с корректировкой управляющих воздействий на стадии горного передела. Систематизированы сведения о не имеющей в мировой практике аналогов технологии выщелачивания металлов в дезинтеграторе. Приведены результаты экспериментов по оптимизации вариантов извлечения металлов из хвостов обогащения руд цветных и черных металлов выщелачиванием. Сформулированы математические модели, по которым построены графики зависимости извлечения металла от предикторов, подтверждающие корректность выполненного эксперимента. Сформулированы основные положения развиваемой авторами концепции безотходной переработки некондиционного металлосодержащего минерального сырья. Предложена модель эффективности утилизации хвостов обогащения. Показано, что вовлечение в производство техногенных минеральных ресурсов упрочняет сырьевую базу горной промышленности. Радикальной мерой вовлечения в производство техногенных запасов хвостов обогащения металлических руд является комбинирование процессов химическо-го выщелачивания и механохимической активации в дезинтеграторе.

Ключевые слова: минеральные ресурсы, горное предприятие, технология, хвосты обогащения, дезинтегратор, математические модели, экология, отходы, снижение отходов, устойчивая добыча ресурсов, промышленное развитие.

Для цитирования: Панфилова Т. А., Тынченко В. С., Кукарцев В. А., Башмур К. А., Кондратьев В. В. К концепции выщелачивания металлосодержащего сырья в дезинтеграторе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 239–251. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_239.

To the concept of leaching metal-containing raw materials in the dizintegrator

T.A. Panfilova¹, V.S. Tynchenko^{1,2,3}, V.A. Kukartsev¹, K.A. Bashmur¹, V.V. Kondratiev⁴

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: tpanfilova@sfu-kras.ru

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

⁴ A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract: The growth in the consumption of metal-containing raw materials, climatic changes, the depletion of coal reserves in regions comfortable for mining actualize the need to modernize metal mining technologies. The completeness of the use of reserves increases with the leaching of metals from the tailings of the enrichment of metal ores in the disintegrator. The analysis of the capabilities of this technology is based on the results of the analysis of best practices and modeling of parameters. The scientific novelty of the proposed solution consists in the development of the fundamentals of technological processes for processing substandard raw materials using new metal extraction technologies. The establishment of system connections and regularities makes it possible to systematize and formalize the principles of modeling metal extraction processes with a differentiated assessment of constant and variable factors. It becomes possible to develop management models for this section of mining production with the adjustment of control actions at the stage of mining redistribution. The article systematizes information about the technology of metal leaching in a disintegrator, which has no analogues in world practice. The results of experiments on the optimization of options for the extraction of metals from the tailings of the enrichment of ores of non-ferrous and ferrous metals by leaching are presented. Mathematical models are formulated, according to which graphs of the dependence of metal extraction on predictors are constructed, confirming the correctness of the experiment performed. The main provisions of the concept of waste-free processing of substandard metal-containing mineral raw materials developed by the authors are formulated. A model of the efficiency of utilization of enrichment tailings is proposed. It is shown that the involvement of technogenic mineral resources in the production strengthens the raw material base of the mining industry. A radical measure of involving metal ore enrichment tailings in the production of technogenic stocks is the combination of chemical leaching and mechanochemical activation processes in the disintegrator.

Key words: mineral resources, mining enterprise, technology, tailings, disintegrator, mathematical models, ecological, waste, zero waste, sustainable resource use, industrial development.

For citation: Panfilova T. A., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Bashmur K. A., Kondratiev V. V. To the concept of leaching metal-containing raw materials in the dizintegrator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1):239-251. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_239.

Введение

Техногенные месторождения являются результатом деятельности добывающих предприятий при опережающей выемке богатых участков месторождений, обусловленной изменением конди-

ции на руду или экономически целесообразным пределом извлечения металлов [1 – 3].

Объем утилизации отходов переработки не превышает первых процентов от объемов добычи руд и может быть

увеличен при рационализации подхода к освоению природных ресурсов путем использования нацеленных на снижение техногенных отходов методов.

В результате интенсивного развития горно-металлургического комплекса накоплен значительный объем отходов горного производства, большая часть которых сформирована предприятиями горнодобывающей отрасли.

При разработке только 15% крупных месторождений использование отходов руд входит в состав технологического цикла [4]. Большая часть утилизируемых отходов используются при изготовлении бетонов.

Проблема безотходности горного производства включает в себя основные аспекты:

- вопросы извлечения из недр руд и ценных компонентов из них составляют единый технологический комплекс;
- параметры комплексирования добычи и переработки руд назначаются с приоритетом условия минимизации ущерба для окружающей среды [5, 6].

Комплексное использование отходов при горном переделе предусматривает глубокую переработку техногенного сырья с извлечением полезных компонентов и выбросом тяжелых металлов и радионуклидов не более предельных норм.

Себестоимость товарной продукции из утилизированных отходов на порядок меньше, поэтому развитие этого направления может быть экономически приемлемым.

Традиционные методы магнитного, гравитационного и электрохимического обогащения позволяют выделить в товарные продукты только часть полезных компонентов отходов, оставляя вторичные хвосты [7].

Ухудшение условий разработки рудных месторождений усиливает негативное воздействие на природную среду,

поэтому спрос на продукцию горного производства будет все труднее удовлетворять.

В процессе переработки полезных ископаемых выход в хвосты составляет 30 – 99,9% добытой горной массы. Хвостохранилища создают условия для рассеивания пыли и загрязнения биосферы на протяжении сотен километров. Под породные отвалы отчуждается по 0,1 га площади земли на 1000 т сырья.

В ходе эксплуатации месторождений образуется выработанное пространство, которое не только реагирует на изменение геодинамической и сейсмической ситуации в регионе, но и влияет на окрестности.

Можно прогнозировать, что в перспективе будут осваиваться глубокие горизонты действующих месторождений, резервные месторождения с некомфортными условиями эксплуатации, некондиционные запасы, что увеличит объем отходов переработки [4 – 6].

Возможности большинства традиционных технологий обогащения и металлургии ограничены использованием только механической энергии. Выщелачивание растворами реагентов увеличивает извлечение металлов, но требует



Рис. 1. Дезинтегратор для механохимической активации выщелачивания металлов

Fig. 1. Disintegrator for mechanochemical activation of metal leaching

продолжительного времени и не гарантирует извлечения до нужного уровня.

Этих недостатков лишена технология выщелачивания в дезинтеграторе (рис. 1) [7 – 10].

Активация процессов выщелачивания в дезинтеграторе приложением большой механической энергии при скорости обработки более 250 м/с позволяет получать продукты на два порядка быстрее, дешевле и без ограничений по санитарным условиям.

Это направление открывает возможности прорывного совершенствования технологии извлечения металлов из руд, в том числе хвостов первичной переработки. Реализация технологии обеспечивается с привлечением возможностей информационных технологий, в том числе:

- контроль параметров процесса машинными методами;
- версификация вариантов технологических решений;
- использование машинных языков при разработке программ;
- разработка имитационных проектных комплексов.

Первый в горной практике дезинтегратор на руднике «Шокпак» (Северный Казахстан) [5] обеспечивал 55% выхода активного класса вяжущего шлака, что позволяло ему конкурировать с цементом при изготовлении бетонных кладочных смесей.

С точки зрения управления производством горное предприятие представляет собой систему с большим количеством тесно взаимосвязанных элементов, обеспечивающую нужный объем добычи и переработки полезного ископаемого при приемлемых затратах [11 – 14].

Показатели эффективности разработки месторождения ставятся в зависимость от полноты учета комплекса переменных факторов [15 – 18], в том числе зависящих от конъюнктуры на мировом

рынке металлов. Природоохранная сущность утилизации хвостов переработки заключается в исключении необходимости их хранения на земной поверхности [19 – 20].

Методы

Доказательство эффективности механохимической технологии получения металлов осуществляется экспериментально.

Экспериментально сравниваются варианты выщелачивания металлов из хвостов обогащения руд:

- выщелачивание в перколяторе с перемешиванием;
- выщелачивание в перколяторе с перемешиванием после активации в дезинтеграторе;
- выщелачивание в дезинтеграторе.

Независимые факторы эксперимента с планированием по методу Венкена-Бокса:

- содержание серной кислоты в растворе (X_1);
- содержание хлорида натрия в растворе (X_2);
- соотношение масс выщелачивающего раствора и хвостов (X_3);
- скорость вращения роторов дезинтегратора, Гц (X_4).

Хвосты обогащения полиметаллических руд Садонского месторождения (РСО-Алания) содержали металлы, в том числе, %: цинк – 0,95; свинец – 0,84; серебро – 0,015; медь – 0,18; марганец – 0,015.

Исследование параметров агитационного выщелачивания:

- единичная проба содержит 50 г измельченных до крупности 2 мм хвостов;
- количество выщелачивающего раствора определяется отношением «жидкого к твердому»;
- раствор смешивается с хвостами и подвергается агитационному выщела-

чиванию в течение заданного времени с постоянной скоростью вращения;

- отфильтрованный раствор не позже 24 часов после получения исследуется на содержание свинца и цинка.

Исследование параметров активации:

- для компенсации уноса мелких фракций проба увеличивается на 10 г;

- во избежание снижения эффекта активации хвосты выщелачивают сразу же после дезинтегратора;

- выщелачивание после дезинтегратора осуществляется с постоянной скоростью агитатора.

Независимые факторы, влияющие на извлечение металлов в производственный раствор, варьируются на трех уровнях — минимальном, нулевом и максимальном.

Нелинейный регрессионный анализ полученных количественных показателей осуществляется приведением уравнения к линейной форме. Алгоритм регрессионного анализа представляется в виде компьютерной программы на языке MATLAB. Коэффициент детерминации для зависимости извлечения принимается по таблице.

Для анализа параметров активации минералов строятся графики зависимости извлечения металла от каждого из предикторов.

Обсуждение результатов

В результате регрессионного анализа результатов эксперимента получены математические модели вида:

$$\varepsilon = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_{12} + a_6 X_{22} + a_7 X_{32} + a_8 X_{42} + a_9 X_1 X_3 + a_{10} X_1 X_4 + a_{11} X_2 X_3 + a_{13} X_3 X_4$$

Коэффициент детерминации для зависимости извлечения цинка составил $R_2 = 0,85851$, для зависимости извлечения свинца — $R_2 = 0,78037$, для зависимости извлечения железа — $R_2 = 0,94587$.

Для объективной оценки характера изменения зависимостей применен графоаналитический метод. Для наглядности изменения величины извлечения наиболее крупных групп металлов построены графики зависимости извлечения металла от каждого из предикторов, при этом значения трех оставшихся предикторов принимались средними, т.е. для $X_1 = 6$ г/л, $X_2 = 90$ г/л, $X_3 = 7$, $X_4 = 125$ Гц (рис. 2–5).

На процесс в порядке убывания влияют следующие факторы: содержание в выщелачивающем растворе реагента, частота вращения роторов дезинтегратора; число циклов переработки в дез-

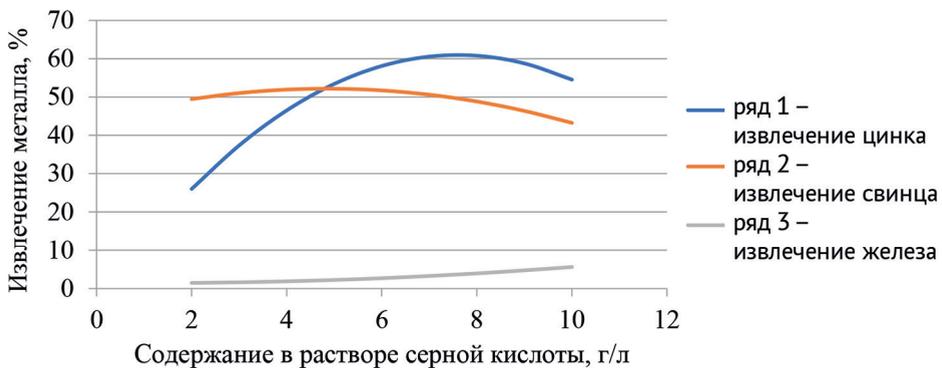


Рис. 2. Зависимость извлечения металла в раствор от содержания в выщелачивающем растворе серной кислоты

Fig. 2. Dependence of metal extraction into solution on the content of sulfuric acid in the leaching solution

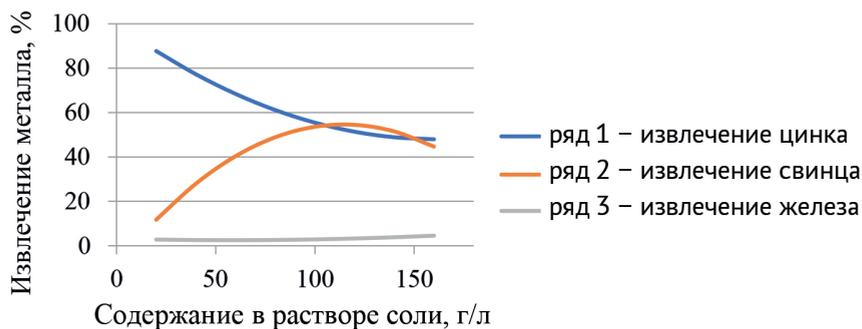


Рис. 3. Зависимость извлечения металла в раствор от содержания в выщелачивающем растворе соли
 Fig. 3. Dependence of metal extraction into the solution on the salt content in the leaching solution

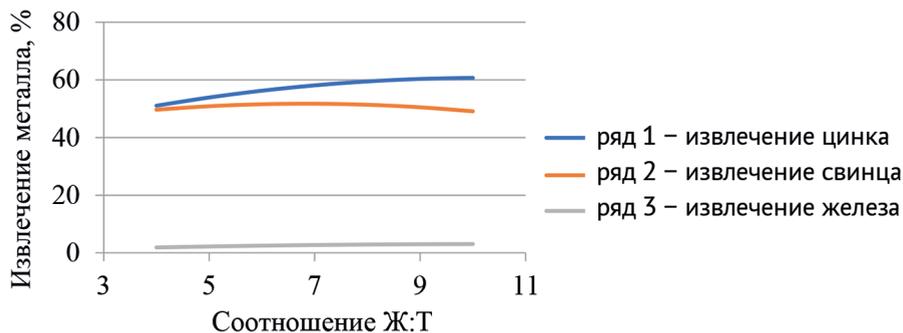


Рис. 4. Зависимость извлечения металла от соотношения твердой и жидкой фаз
 Fig. 4. Dependence of metal extraction on the ratio of solid and liquid phases

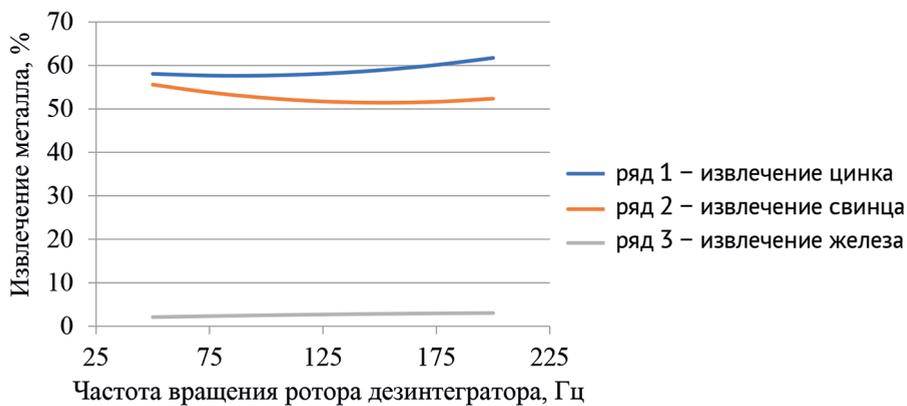


Рис. 5. Зависимость извлечения металла от интенсивности механической активации или частоты вращения роторов дезинтегратора
 Fig. 5. Dependence of metal extraction on the intensity of mechanical activation or the rotational speed of the disintegrator rotors

интеграторе и соотношении масс выщелачивающего раствора и хвостов.

Зависимости непрерывного характера на графике имеют точки перегиба и

экстремума, что подтверждает корректность технологии механохимической активации при выщелачивании металлов в дезинтеграторе. Точность прогнозиро-

вания может быть повышена за счет использования более совершенных средств информационных технологий для измерения весьма малых концентраций извлекаемых в процессе выщелачивания металлов. Зависимости между исследуемыми параметрами выщелачивания разнородного сырья и показателями извлечения металлов могут быть использованы для отыскания оптимальных значений искомых параметров методами информационных технологий.

Реагентное выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом отдельной активации в дезинтеграторе и выщелачивания вне его обеспечивает примерно одинаковое извлечение металлов, но сокращает продолжительность процесса на два порядка.

С учетом полученных экспериментальных данных концепцию безотходной переработки некондиционного минерального сырья можно сформулировать так:

1. Традиционные обогатительные процессы не обеспечивают полного раскрытия минералов и не применимы для извлечения металлов из хвостов обогащения руд до уровня санитарных требований.

2. Глубокое извлечение металлов из некондиционного сырья обеспечивает сочетание возможностей химического выщелачивания и механической активации в дезинтеграторе.

3. Параметры механохимической активации выщелачивания металлов подлежат прогнозированию на основании результатов опытных работ по единой методике с формализацией требований.

Эколого-экономическая эффективность горнопромышленного комплекса характеризуется затратами на производство продукции при минимизации ущерба природным экосистемам и повышении использования недр. При определении прибыли должны учитывать-

ся также ресурсы, извлеченные из недр, но не нашедшие реализации в виде продукции.

Модель эффективности предприятия с учетом утилизации некондиционного сырья имеет вид:

$$P = A(C - C) \frac{1}{(1 + E)^{t-1}} + K(1 + E_H) + \gamma [A_H(C_H - C_H) - K_H(1 + E_H)]$$

где A — мощность предприятия по добыче руды, т/год; C — извлекаемая ценность добываемой руды, руб./т; C — затраты на добычу и переработку руды, руб./т; t — время применения технологии, годы; E — коэффициент дисконтирования затрат и прибыли, доли ед.; E_H — процентная ставка за банковский кредит для выполнения работ, доли ед.; K — капиталовложения в строительство (год), руб.; γ — выход отходов, доли ед.; A_H — мощность предприятия по переработке некондиционного сырья, руб./т; C_H — извлекаемая из некондиционного сырья ценность, руб./т; C_H — затраты на переработку некондиционного сырья, руб./т; K_H — затраты на строительство объектов переработки некондиционного сырья, руб.

Результаты исследования углубляют сложившуюся в последние годы концепцию выщелачивания некондиционного минерального сырья в дезинтеграторе [21 — 23].

Раскрываются связи проблемы извлечения металлов из некондиционного сырья с другими задачами функционирования горнодобывающего предприятия [24 — 27].

Полученные зависимости и связи хорошо согласуются с результатами исследования соседствующих проблем горного дела в добывающих отраслях экономики [28 — 30].

Результаты исследования могут быть востребованы как методическое пособие

при решении вопросов эксплуатации месторождений ресурсо- и природосберегающими технологиями [31 – 34]. Работа представляет собой очередной шаг в совершенствовании прорывной технологии с многогранными положительными последствиями экологического [35] и экономического плана [36 – 39].

Математическая модель процессов выщелачивания металлов из руд увязывает условия и технологические особенности получения металлов, которые описаны регрессионными зависимостями и подлежат прогнозированию.

При отработке техногенных месторождений в эксплуатацию вовлекаются некондиционные запасы, величина которых сопоставима с исходными запасами крупных месторождений. При наличии резервов мощностей для переработки вовлечение в оборот некондиционных запасов становится эффективным, поскольку затраты на их производство уже списаны на добычу основных запасов.

Наибольший экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии достигается за счет увеличения запасов полезных ископаемых и продления жизненного цикла месторождений.

Оценка потерянной ценности полезных компонентов позволяет использовать единый критерий технологии – прибыль с учетом ущерба от потерь в недрах и на земной поверхности.

Исключение необходимости хранения хвостов на земной поверхности обеспечивает прибыль не только от реализации продуктов переработки, но и за счет минимизации ущерба окружающей среде региона.

В работе над статьей использованы результаты исследований в смежных отраслях горного производства [40 – 43].

Заключение

Накопление на земной поверхности некондиционного металлосодержащего сырья может быть минимизировано путем его утилизации с вовлечением его компонентов в природный круговорот веществ и упрочнением сырьевой базы горной промышленности.

Эффективность утилизации некондиционного минерального сырья зависит от успеха комбинирования механохимической активации процессов выщелачивания в дезинтеграторе в рамках единого технологического цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Литературу с п. 1 по п. 19 смотри в REFERENCES.

20. *Ляшенко В. И.* Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых // *Маркшейдерский вестник*. – 2015. – № 1. – С. 10 – 15.

21. *Golik V. I., Dmitrak Yu. V., Brigida V. S.* Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings // *Scientific Bulletin of the National University of Chemistry*. 2020, vol. 5, pp. 47 – 54. DOI: 10.33271/nvngu/2020-5/047.

22. *Li G., Zhou Q., Zhu Z., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T.* Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 189, pp. 620 – 626. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.083.

23. *Suslov K. V., Solonina N. N., Smirnov A. S.* Smart meters for distributed filtering of high harmonics in Smart Grid / *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. 2011, article 6036552. DOI: 10.1109/PowerEng.2011.6036552.

24. *Kongar-Syuryun Ch., Aleksakhin A., Khayrutdinov A., Tyulyaeva Y.* Research of rheological characteristics of the mixture as a way to create a new backfill material with specified

characteristics // *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 8, pp. 2052–2054. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.139.

25. Евдокимов С. И., Евдокимов В. С. Повышение извлечения золота на основе совместной переработки руды и отходов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2017. — № 2. — С. 154–160.

26. Валиев Н. Г., Пропп В. Д., Вандышев А. М. Кафедре горного дела УГГУ – 100 лет // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. — 2020. — № 8. — С. 130–143.

27. 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. — Т. 6. — № 2. — С. 73–89.

28. 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.

29. 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, vol. 61, pp. 40–57. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.019.

30. Ilyushin P., Kulikov A., Suslov K., Filippov S. Consideration of distinguishing design features of gas-turbine and gas-reciprocating units in design of emergency control systems // *Machines*. 2021, vol. 9, no. 3, article 47. DOI: 10.3390/machines9030047.

31. Karamov D. N., Suslov K. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements // *Energy Reports*. 2021, vol. 7, pp. 349–358. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.01.059.

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

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

34. Бунин И. Ж., Рязанцева М. В., Самусев А. Л., Хабарова И. А. Теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы и водные суспензии // *Горный журнал*. — 2017. — № 11. — С. 134–139. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.14.

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

36. Solodusha S., Gerasimov D. Applicability of Volterra integral polynomials in the control systems of electric power facilities / *Proceedings of 2016 International Conference «Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems» (Pyatnitskiy's Conference)*. STAB 2016. 2016. DOI: 10.1109/STAB.2016.7541227.

37. Молчанов В. И., Селезнева О. Г., Жирнов Е. Н. Активация минералов. — М.: Недра, 1988. — 208 с.

38. Федоров А. А., Чекушина Т. В. Перспективы использования электрохимических воздействий для совершенствования геотехнологических методов переработки упорных золотосодержащих руд / *Тезисы докладов III Международной конференции: Новые идеи в науках о Земле*. Т. 3. — М.: МГГА, 1997.

39. Чантурия В. А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья // *Горный журнал*. — 2017. — № 11. — С. 67–84. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.01.

40. Bosikov I. I., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Ereemeva S. V. Complex assessment of X-ray diffraction in crystals with face-centered silicon carbide lattice // *Crystals*. 2023, vol. 13, no. 3, article 528. DOI: 10.3390/cryst13030528.

41. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Savchenko I. A., Kukartsev V. V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits // *Fire*. 2023, vol. 6, no. 3, article 95. DOI: 10.3390/fire6030095.

42. Логачев А. В. Интенсификация процессов выщелачивания золота из хвостов / Материалы международной конференции: Проблемы геологии и освоение недр. — Томск: ТПУ, 2009. — С. 51 — 55.

43. Рыбак Я., Хайрутдинов М., Конгар-Сюрюн Ч., Тюляева Ю. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 3(49). — С. 405 — 415. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415. **ИТАБ**

REFERENCES

1. Golik V., Doolin A., Komissarova M., Doolin R. Evaluating the effectiveness of utilization of mining waste. *International Business Management*. 2015, vol. 9, no. 5, pp. 935 — 939. DOI: 10.36478/ibm.2015.935.939.

2. Konyuhov V. Y., Konstantinova M. V., Gladkih A. M. Determination of restored units spectrum of equipment and development of the assembly unit repair method at industrial enterprises. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1353, no. 1, article 012047. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012047.

3. Kondrtiev V. V., Govorkov A. S., Kolosov A. D., Gorovoy V. O., Karlina A. I. The development of a test stand for developing technological operation «flotation and separation of MD2. The deposition of nanostructures MD1» produce nanostructures with desired properties. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12373 — 12377.

4. Konyuhov V. Yu., Gladkih A. M., Galyautdinov I. I., Severina Y. D. Economic aspects of green technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 350, no. 1, article 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012036.

5. Efremenkov E. A., Shanin S. A., Martyushev N. V. Development of an algorithm for computing the force and stress parameters of a cycloid reducer. *Mathematics*. 2023, vol. 11, no. 4, article 993. DOI: 10.3390/math11040993.

6. Strateichuk D. M., Klyuev R. V., Gladkih V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko Y. A. Morphological features of polycrystalline CdS_{1-x}Se_x films obtained by screen-printing method. *Crystals*. 2023, vol. 13, no. 5, article 825. DOI: 10.3390/cryst13050825.

7. Kondratiev V. V., Nebogin S. A., Sysoev I. A., Gorovoy V. O. Description of the test stand for developing of technological operation of nano-dispersed dust preliminary coagulation. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12809 — 12813.

8. Kondratiev V. V., Karlina A. I., Guseva E. A., Konstantinova M. V., Kleshnin A. A. Processing and application of ultra disperse wastes of silicon production in construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 463, no. 3, article 032068. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032068.

9. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, vol. 7, no. 3, pp. 38 — 41.

10. Adigamov R. R., Baraboshkin K. A., Mishnev P. A. Development of rolling procedures for pipes of K55 strength class at the laboratorial mill. *CIS Iron and Steel Review*. 2022, vol. 24, pp. 60 — 66. DOI: 10.17580/cisisr.2022.02.09.

11. Freeman A. M., Herriges J. A., Kling C. L. *The measurement of environmental and resource values. Theory and methods*. New York, USA: RFF Press, 2014, 325 p.

12. Harris J. M., Roach B. *Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach*. New York: M. E. Sharpe, Inc. Armonk, 2013. 246 p.
13. Isametova M. E., Karlina Y. I., Kononenko R. V., Skeebeba V. Y., Absadykov B. N. Thermal pulse processing of blanks of small-sized parts made of beryllium bronze and 29 NK alloy. *Materials*. 2022, vol. 15, no. 19, article 6682. DOI: 10.3390/ma15196682.
14. Sivtsov A. V., Yolkin K. S., Yolkin D. K. Role of the silicon carbide content in the certain workspace zones of furnaces used for smelting silicon and high-silicon ferroalloys. *Metallurgist*. 2022, vol. 65, no. 9-10, pp. 952 – 959. DOI: 10.1007/s11015-022-01235-z.
15. Gozbenko V. E., Khomenko A. P., Kargapoltsev S. K., Minaev N. V. Creating of the alternative lubricants and practice of their use. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12369 – 12372.
16. Rezanov V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Grinek A. V., Skeebeba V. Y., Lyosin A. V. Study of melting methods by electric resistance welding of rails. *Metals*. 2022, vol. 12, article 2135. DOI: 10.3390/met12122135.
17. Sysoev I. A., Ershov V. A., Kondrat'ev V. V. Method of controlling the energy balance of electrolytic cells for aluminum production. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 5-6, pp. 518 – 525. DOI: 10.1007/s11015-015-0134-1.
18. Martyushev N. V., Kozlov V. N., Qi M., Tynchenko V. S., Kononenko R. V., Valuev D. V. Production of workpieces from martensitic stainless steel using electron-beam surfacing and investigation of cutting forces when milling workpieces. *Materials*. 2023, vol. 16, no. 13, article 4529. DOI: 10.3390/ma16134529.
19. Kuz'min M. P., Larionov L. M., Grigoriev V. G., Kuz'mina A. S. Use of the burnt rock of coal deposits slag heaps in the concrete products manufacturing. *Construction and Building Materials*. 2018, vol. 179, pp. 117 – 124. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.222.
20. Lyashenko V. I. Environmental technologies for the development of complex-structured mineral deposits. *Mine Surveying Bulletin*. 2015, no. 1, pp. 10 – 15. [In Russ].
21. Golik V. I., Dmitrak Yu. V., Brigida V. S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Scientific Bulletin of the National University of Chemistry*. 2020, vol. 5, pp. 47 – 54. DOI: 10.33271/nvngu/2020-5/047.
22. Li G., Zhou Q., Zhu Z., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 189, pp. 620 – 626. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.083.
23. Suslov K. V., Solonina N. N., Smirnov A. S. Smart meters for distributed filtering of high harmonics in Smart Grid. *International Conference on Power Engineering. Energy and Electrical Drives*. 2011, article 6036552. DOI: 10.1109/PowerEng.2011.6036552.
24. Kongar-Syuryun Ch., Aleksakhin A., Khayrutdinov A., Tyulyaeva Y. Research of rheological characteristics of the mixture as a way to create a new backfill material with specified characteristics. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 8, pp. 2052 – 2054. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.139.
25. Evdokimov S. I., Evdokimov V. S. Increase extraction of gold on the basis of joint processing of ore and waste. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2017, no. 2, pp. 154 – 160. [In Russ].
26. Valiev N. G., Propp V. D., Vandyshv A. M. The Mining Department of UGSU is 100 years old. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 8, pp. 130 – 143. [In Russ].
27. Ignatieva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Strovsky V. E. Technogenic mineral formations: problems of transition to a closed-cycle economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, vol. 6, no. 2, pp. 73 – 89. [In Russ].
28. 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.

29. 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, vol. 61, pp. 40–57. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.019.

30. Ilyushin P., Kulikov A., Suslov K., Filippov, S. Consideration of distinguishing design features of gas-turbine and gas-reciprocating units in design of emergency control systems. *Machines*. 2021, vol. 9, no. 3, article 47. DOI: 10.3390/machines9030047.

31. Karamov D. N., Suslov K. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements. *Energy Reports*. 2021, vol. 7, pp. 349–358. DOI: 10.1016/j.egy.2021.01.059.

32. 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.

33. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 7–16. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16.

34. Bunin I. Zh., Ryazantseva M. V., Samusev A. L., Khabarova I. A. Theory and practice of combined physico-chemical and energy effects on geomaterials and water suspensions. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 11, pp. 134–139. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.14.

35. Kulikova A. A., Ovchinnikova T. I. A regional criterion for classifying mining regions as territories with the greatest exposure to geocological changes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 27–34. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.

36. Solodusha S., Gerasimov D. Applicability of Volterra integral polynomials in the control systems of electric power facilities. *Proceedings of 2016 International Conference «Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems» (Pyatnitskiy's Conference). STAB 2016*. 2016. DOI: 10.1109/STAB.2016.7541227.

37. Molchanov V. I., Selezneva O. G., Zhirnov E. N. *Aktivatsiya mineralov* [Activation of minerals], Moscow, Nedra, 1988, 208 p.

38. Fedorov A. A., Chekushina T. V. Prospects for the use of electrochemical influences to improve geotechnological methods of processing resistant gold-bearing ores. *Tezisy dokladov III Mezhdunarodnoy konferentsii: Novye idei v naukakh o Zemle* [Abstracts of the third International Conference: New ideas in Earth Sciences], vol. 3, Moscow, MGGA, 1997. [In Russ].

39. Chanturia V. A. Scientific substantiation and development of innovative processes of complex processing of mineral raw materials. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 11, pp. 67–84. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.01.

40. Bosikov I. I., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Ereemeeva S. V. Complex assessment of X-ray diffraction in crystals with face-centered silicon carbide lattice. *Crystals*. 2023, vol. 13, no. 3, article 528. DOI: 10.3390/cryst13030528.

41. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Savchenko I. A., Kukartsev V. V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits. *Fire*. 2023, vol. 6, no. 3, article 95. DOI: 10.3390/fire6030095.

42. Logachev A. V. Intensification of gold leaching processes from tailings. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii: Problemy geologii i osvoenie nedr* [Materials of the International Conference: Problems of geology and subsoil development], Tomsk, TPU, 2009, pp. 51–55. [In Russ].

43. Rybak Ya., Khairutdinov M., Kongar-Suryun Ch., Tyulyaeva Yu. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 3(49), pp. 405–415. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Панфилова Татьяна Александровна*¹ — канд. техн. наук,
доцент, Институт нефти и газа,

e-mail: tpanfilova@sfu-kras.ru,

*Тынченко Вадим Сергеевич*¹ — канд. техн. наук,

доцент, НОЦ Технологии искусственного
интеллекта МГТУ им. Н.Э. Баумана;

Сибирский государственный университет

науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,

e-mail: vadimond@mail.ru,

*Кукарцев Виктор Алексеевич*¹ — канд. техн. наук,

доцент, Политехнический институт,

e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru,

*Башмур Кирилл Александрович*¹ — старший

преподаватель, Институт нефти и газа,

e-mail: bashmur@bk.ru,

Кондратьев Виктор Викторович — канд. техн. наук,

старший научный сотрудник, Институт геохимии

им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН,

e-mail: v.kondratiev@igc.irk.ru,

¹ Сибирский федеральный университет.

Для контактов: Панфилова Т.А., e-mail: tpanfilova@sfu-kras.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*T.A. Panfilova*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
School of Petroleum and Natural Gas Engineering,

e-mail: tpanfilova@sfu-kras.ru,

*V.S. Tynchenko*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Artificial Intelligence Technology Scientific

and Education Center, Bauman Moscow State

Technical University, 105005, Moscow, Russia;

M.F. Reshetnev Siberian State University

of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russia;

School of Petroleum and Natural Gas Engineering,

e-mail: vadimond@mail.ru,

*V.A. Kukartsev*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Polytechnic School, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru,

*K.A. Bashmur*¹, Senior Lecturer,

School of Petroleum and Natural Gas Engineering,

e-mail: bashmur@bk.ru,

V.V. Kondratiev, Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher, A.P. Vinogradov Institute

of Geochemistry, Siberian Branch of Russian Academy

of Sciences, 664523, Irkutsk, Russia,

e-mail: v.kondratiev@igc.irk.ru,

¹ Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia.

Corresponding author: T.A. Panfilova, e-mail: tpanfilova@sfu-kras.ru.

Получена редакцией 06.07.2023; получена после рецензии 20.09.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 06.07.2023; received after the review 20.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.