

Перспективы увеличения минеральной базы цветной металлургии

В.И. Голик¹✉, А.В. Титова²

¹Московский государственный политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

²Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ v.i.golik@mail.ru

Резюме: Рассмотрены вопросы упрочнения минерально-сырьевой базы цветной металлургии путем вовлечения в производство отходов обогащения вскрываемых руд. Актуальность исследования объясняется снижением уровня обеспеченности минеральными ресурсами. Традиционные технологии переработки руд увеличивают объем хвостов переработки в хранилищах. Не развивается безотходная утилизация отходов первичной переработки, которые нередко используют без извлечения из них металлов до норм санитарных требований. Острые кризисные экологические проблемы усугубляются в первую очередь отсутствием рычагов централизованного учета и регулирования накопившихся отходов. Эффективность технологий с выщелачиванием доказывается комплексным методом, включающим в себя эксперименты и расчеты с сопоставлением показателей вариантов переработки. Получены количественные значения и выполнены графики зависимости извлечения металла от участвующих факторов, которые позволяют характеризовать процессы выщелачивания хвостов обогащения в дезинтеграторе. Доказано, что при механохимической активации процесса выщелачивания извлечение металлов превышает извлечение при переработке отходов традиционными технологиями с обеспечением безопасного по санитарным требованиям уровня. Определено, что активация в дезинтеграторе в процессе выщелачивания металлов повышает прочность бетонных смесей на основе вторичных хвостов. Сделан вывод, что активация процессов выщелачивания в дезинтеграторе обеспечивает извлечение из хвостов обогащения от 50 до 80% теряемых ранее металлов. Освоение техногенных месторождений инновационными технологиями с выщелачиванием металлов является реальным шагом по пути расширения минерально-сырьевой базы металлургии и улучшения экологической обстановки в горнодобывающих регионах. В отличие от родственных по тематике и целевому назначению технологий рассматриваемая технология позволяет осуществить безотходную переработку руд.

Ключевые слова: сырьевая база, отходы обогащения, руда, выщелачивание, дезинтегратор, механохимия, металл, прочность бетона, безотходность

Для цитирования: Голик В.И., Титова А.В. Перспективы увеличения минеральной базы цветной металлургии. *Горная промышленность*. 2024;(3):77–84. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-77-84>

Prospects for increasing the mineral base of the non-ferrous metallurgy

V.I. Golik¹✉, A.V. Titova²

¹Moscow State Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

²Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ v.i.golik@mail.ru

Abstract: The article discusses the issues of strengthening the mineral resource base of non-ferrous metallurgy by introducing ore processing wastes into the production cycle. The relevance of the study is explained by the decreasing availability of mineral resources. The conventional ore processing technologies increase the volume of processing tailings in storages. Waste-free disposal of primary processing waste is not developing, and this waste is often used without extracting metals from it to match the sanitary requirements. The acute environmental problems are aggravated primarily by the lack of leverage for centralized accounting and regulation of the accumulated waste. The efficiency of leaching technologies is proved by a comprehensive method that includes experiments and calculations with a comparison of processing options. Quantitative values have been obtained and dependence diagrams of metal extraction on the contributing factors have been plotted, which make it possible to characterize the processes of leaching the mill tailings using a disintegrator. It has been proved that during the mechanochemical activation of the leaching process, metals extraction exceeds the extraction efficiency of the conventional waste processing technologies and ensures a safe level according to the sanitary requirements. It is determined that the mechanochemical activation in the disintegrator during metal leaching increases the strength of concrete mixtures based on secondary tailings. It is concluded that activation of the leaching processes in the disintegrator ensures the extraction of 50 to 80% of the previously lost metals from the mill tailings. The development of man-made deposits with innovative technologies with metal leaching is a real step towards expanding the mineral resource base of metallurgy and improving the environmental situation in the mining regions. Unlike the technologies related in terms of the application area and the purpose, the discussed technology enables waste-free processing of ores.

Keywords: raw material base, ore processing waste, ore, leaching, disintegrator, mechanochemistry, metal, concrete strength, waste-free

For citation: Golik V.I., Titova A.V. Prospects for increasing the mineral base of the non-ferrous metallurgy. *Russian Mining Industry*. 2024;(3):77–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-77-84>

Введение

Россия занимает ведущие позиции по запасам основных видов полезных ископаемых, но качество ее запасов по ряду позиций ниже, чем в других странах. Ей принадлежит первое место в мире по запасам железных руд, но руд с содержанием железа 60% менее 9%, тогда как у Австралии, Бразилии и Китая их около двух третей. По меди богатые руды выработаны. Цинковые и свинцовые руды в разы уступают рудам Австралии и Канады, а по качеству бокситов – Австралии, Гвинеи и Греции. Наши запасы оловянных руд в два-три раза уступают бразильским, индонезийским и малайзийским. Несмотря на обладание самыми большими запасами титановых руд, Россия титан импортирует. Содержание металла в наших вольфрамовых рудах в два с лишним раза ниже, чем в Китае, а в молибденовых – в три-четыре раза ниже, чем в США.

Если оперировать цифрами наших дней по добыче, можно привести следующие примеры. При добыче полезных ископаемых теряется около 12% угля, 3% меди и 4% железа. В общей структуре ресурсов и запасов золота России на долю техногенных объектов приходится около 7–12%. При этом себестоимость извлечения золота из техногенных месторождений иногда бывает ниже, чем при обогащении исходных руд и песков, поскольку из технологической цепочки исключаются дорогостоящие операции, связанные с добычей, дроблением и классификацией.

При добыче цветных и редких металлов удельные показатели образования отходов на единицу полезного продукта многократно возрастают. В частности, на 1 т цветных металлов образуется не менее 100–150 т отходов при добыче и более 50–60 т при переработке. На 1 т редких, благородных и радиоактивных металлов образуется до 5–10 тыс. т отходов в процессах добычи и от 10 до 100 тыс. т при переработке (табл. 1).

Таблица 1
Показатели образования отходов при добыче и переработке различных полезных ископаемых

Table 1.
Waste generation indicators for mining and processing of various minerals

Полезный продукт	Полезный продукт	
	в процессе добычи	в процессе переработки
1 т угля	3 т	0,2–0,3 т
1 т стали	5–6 т	0,5–0,7 т
1 т цветных металлов	100–150 т	Более 50–60 т
1 т редких, благородных и радиоактивных металлов	До 5–10 тыс. т	От 10 до 100 тыс. т

Актуальность исследования путей модернизации технологий добычи металлов объясняется снижением уровня обеспеченности минеральными ресурсами из-за несоответствия традиционных технологий разработки условиям рынка и экологическим требованиям [1–3]. Так, реализуется стратегия ликвидации «бесперспективных» месторождений, например, угля в Донбассе, вольфрама, молибдена и полиметаллов на Северном Кавказе и др., хотя эффективность их может быть обеспечена использованием новых подходов к добыче и переработке сырья.

Слабыми темпами развивается эффективное направление – утилизация отходов первичной переработки, кото-

рые используют для строительных целей, повышая при этом опасность химического загрязнения экосистем [3–6].

Традиционные технологии добычи и переработки руд характеризуются потерей в недрах некондиционных запасов и накоплением хвостов переработки на земной поверхности. Редкие металлы и рассеянные элементы практически не добываются, а внутренний спрос на них удовлетворяется преимущественно импортной продукцией.

Одной из причин слабых темпов освоения металлической базы субъективного характера является увеличивающийся разрыв между возможностями добычи и переработки руд. Многие запасы не добываются из-за отсутствия рентабельных технологий извлечения металлов. В таких условиях возрастает актуальность разработки новых технологий извлечения металлов из ранее некондиционных для традиционных методов переработки руд [7–10].

Обладая крупнейшими запасами руд цветных металлов и добывая минерального сырья на сумму 5% от стоимости добываемого в мире, Россия не обеспечивает свою минерально-сырьевую национальную безопасность. Экспортируются не добываемые металлы, а полуфабрикаты – продукты переделов руд, в том числе, свинца, вольфрама, цинка и др. металлов.

Переработка некондиционных запасов неэффективна, в то время как совместная добыча и переработка балансовых и забалансовых металлических руд может быть рентабельной. Для извлечения металлов из таких запасов могут быть использованы новые технологии, в том числе подземного и кучного выщелачивания руд и хвостов переработки в активаторах [11–13].

Демографические процессы и научно-техническая революция увеличивают по-требность промышленности в металлах. Так, потребление цветных и легирующих металлов за минувшее столетие увеличилось в 5 раз.

Одной из причин слабых темпов освоения металлической базы является увеличивающийся разрыв между возможностями добычи и переработки руд. Многие руды не добываются из-за отсутствия технологий извлечения из них металлов.

Поэтому целью исследований последнего времени является разработка новых и совершенствование уже освоенных технологий с оптимизацией по критерию полноты использования ресурсов недр.

В основе хозяйственной деятельности человека лежит использование природных ресурсов. В России используется не более 10% добытого металлического сырья, а остальные теряются в виде отходов, загрязняя окружающую природную среду. Экономические и демографические изменения увеличивают номенклатуру и объем используемых материалов и побуждают реализовать направления утилизации отходов, большая часть которых может быть сырьем для изготовления товаров при извлечении из них металлов, в том числе дефицитных и ценных.

Обоснование новых способов утилизации некондиционного металлосодержащего сырья является одним из приоритетных направлений исследований, целью которых является создание технологических основ безотходного производства.

Оптимизация технологий добычи и обогащения руд цветных металлов базируется на системном анализе запасов месторождений с учетом их географического положения и динамики развития в сопоставлении с мировой конъюнктурой (табл. 2).

Таблица 2
Добыча цветных металлов в России

Table 2
Mining of non-ferrous metals in Russia

Руды металлов	Запасы, млн т	Производство 2015 г., тыс. т	Доля в мире, %
Цинк	59,8	388,8	2
Свинец	8,2	156	4
Никель	7,3	310	14
Медь	58	741	4
Титан	118	89	1
Вольфрам	0,199	3,3	3
Олово	0,776	0,6	0,2
Алюминий (бокситы)	518,4	6,85	2
Молибден	1070	3,2	1

Целью исследований последнего времени является разработка новых и совершенствование освоенных технологий с оптимизацией по критерию полноты использования ресурсов извлеченного из недр некондиционного сырья в виде отходов первичной переработки руд.

Для решения проблем выщелачивания металлов может быть использован богатый опыт горнодобывающей отрасли атомной энергетики СССР, где эти технологии начали применяться в 1960-х годах. В настоящее время Приаргунский горно-химический комбинат способами выщелачивания производит более 30% продукции.

Методы

Эффективность технологий с выщелачиванием доказывается комплексным методом, включающим в себя: натурные и лабораторные эксперименты, расчеты и полупромышленные эксперименты по отбойке и дроблению руд, по переводу металлов в раствор и извлечению их из раствора. Полученные результаты корректируются по данным отечественной и зарубежной практики.

Исследования являются компонентом концепции повышения эффективности использования недр за счет вовлечения в производство некондиционных руд в недрах и хвостов первичной переработки.

Эффективность технологий доказывается сопоставлением показателей базового и нового вариантов переработки по критерию извлечения металлов.

Возможность использования хвостов обогащения в качестве сырья для изготовления твердеющих смесей оценена в ходе полнофакторных исследований по программам государственных грантов: государственный контракт № 02.740.11.0323 «Исследование и разработка инновационных технологий комбинированной механохимической активации извлечения металлов из некондиционного сырья» и государственный контракт № 14.740.11.0427 «Снижение риска и уменьшения последствий техногенных катастроф путем создания экологически безопасных технологий разработки техногенных месторождений с добычей из них полезных компонентов методами механохимической активации», а также в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

Проба отобрана в хранилище №4 Лебединского ГОКа и исследована в лаборатории СКГМИ с использованием дезинтегратора DESI-11, изготовленного фирмой «Гефест». Показатели новой технологии сравнивали с показателями традиционной технологии методом Венкена–Бокса с интерпретацией результатов в форме логарифмической или полиномиальной интерполяции.

Активация хвостов обогащения осуществлялась различными способами:

- агитационное выщелачивание металлов в аппаратах-агитаторах или емкостях с перемешиванием выщелачиваемой массы;

- воздействие в дезинтеграторах на минералы высокой механической энергией на атомарном уровне до состояния, когда тонкодисперсная фракция изменяет активность минералов.

В ходе исследования параметров выщелачивания в каждом опыте использовали 50 г измельченных до крупности –2 мм хвостов, раствор смешивали с хвостами и подвергали выщелачиванию с постоянной для каждого способа скоростью вращения.

Исследованы варианты активации хвостов обогащения:

- агитационное выщелачивание;
- агитационное выщелачивание после механической активации;

- выщелачивание в дезинтеграторе;
- агитационное выщелачивание после выщелачивания в дезинтеграторе.

Независимые факторы, влияющие на извлечение металлов в продукционный раствор, варьировались на трех уровнях – минимальном, нулевом и максимальном:

- содержание серной кислоты, г/л: 2, 6,10;
- содержание хлорида натрия, г/л: 20, 90,160;
- отношение массы жидкого вещества к массе твердого, раз: 4, 7,10,

- время выщелачивания, ч: 0,25, 0,625, 1;
- частота вращения роторов дезинтегратора: 50, 125, 200 Гц;

- количество опытов: 3, 5, 7.

Нелинейный регрессионный анализ полученных показателей осуществляли приведением уравнения к линейной форме. Алгоритм регрессионного анализа представлен в виде компьютерной программы на языке MATLAB. Коэффициент детерминации для зависимости извлечения железа $R^2 = 0,94$.

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

Результаты

Извлечение железа в течение 1 ч составило, %: агитационное выщелачивание – 4,75, агитационное выщелачивание после механической активации в дезинтеграторе – 8,5, однократное выщелачивание в дезинтеграторе – 12,5.

Содержание сопутствующих металлов во вторичных хвостах после однократного выщелачивания уменьшается примерно в 3–4 раза.

Графики зависимости извлечения металла от участвующих факторов представлены на рис. 1–4.

В процессе механохимической активации в продукционный раствор извлекается большее количество минеральных веществ, чем при агитационном выщелачивании (табл. 3).

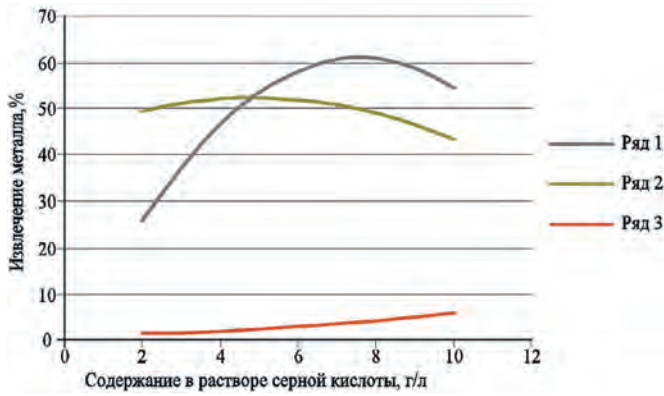


Рис. 1
Зависимость извлечения металла от содержания в растворе серной кислоты: 1 – извлечение в производственный раствор цинка; 2 – извлечение в производственный раствор свинца; 3 – извлечение в производственный раствор железа

Fig. 1
Dependence of metal extraction on the content of sulfuric acid in the solution: row 1 – extraction of zinc into the production solution; row 2 – extraction of lead into the production solution; 3 – extraction of iron into the production solution

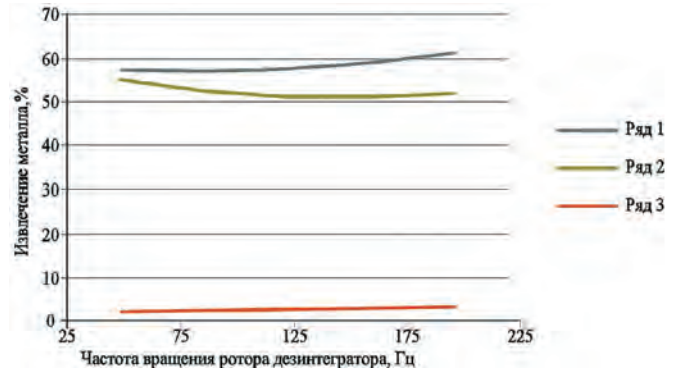


Рис. 4
Зависимость извлечения металла от частоты вращения роторов дезинтегратора

Fig. 4
Dependence of metal extraction on the rotational speed of the disintegrator rotors

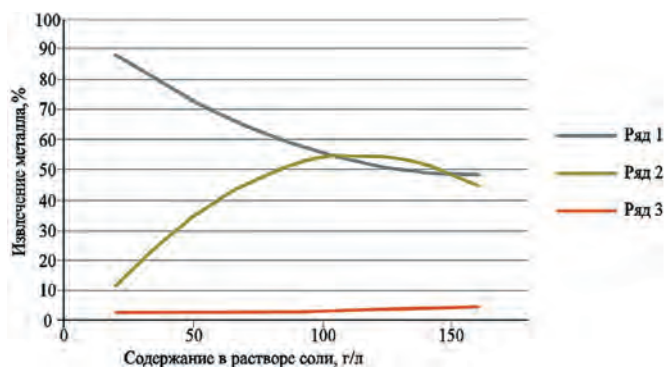


Рис. 2
Зависимость извлечения металла от содержания в растворе соли

Fig. 2
Dependence of metal recovery on the content of salt in solution

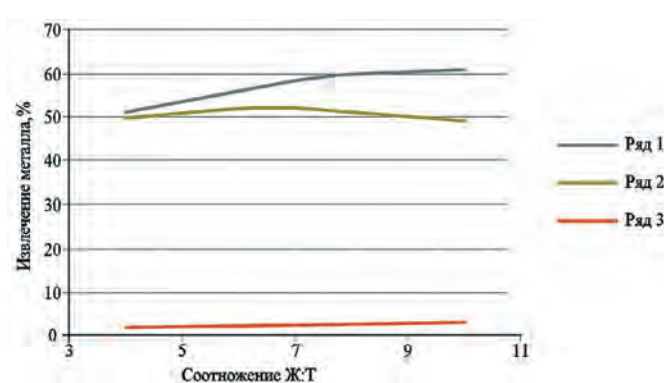


Рис. 3
Зависимость извлечения металла от соотношения твердой и жидкой фаз

Fig. 3
Dependence of metal recovery on the ratio of solid and liquid phases

Таблица 3
Показатели вариантов выщелачивания хвостов обогащения

Table 3
Indicators of various options for tailings leaching

Вариант активации	Остаток во вторичных хвостах, %					
	Al ₂ O ₃	Mn	K ₂ O	P	Ca	Mg O
Агитационное выщелачивание без подготовки	4,9	2,8	0,3	0,07	0,25	0,16
Агитационное выщелачивание после механической активации	4,2	2,5	0,2	0,07	0,23	0,14
Выщелачивание в дезинтеграторе с механо-химической активацией	3,7	2,3	0,2	0,06	0,20	0,11

Большее извлечение металлов из крупных фракций сырья и более высокая производительность при меньшей крупности продолжительности выщелачивания характерны для кислотного выщелачивания.

Скорость извлечения металлов возрастает пропорционально увеличению концентрации металла в руде.

Для интерпретации результатов исследований данного направления применен метод линейного множественного регрессионного анализа. При построении графиков переменным является один параметр, а остальным параметрам придают средние значения в интервалах, например, для Садонских руд: содержание H₂SO₄, г/дм³, 6; содержание соли, г/дм³, 90; соотношение жидкого и твердого 7; время выщелачивания, ч, 0,625; скорость вращения роторов, Гц, 125.

Очевидно резкое различие извлечения в раствор свинца 25–28% и цинка 25–80% при равной концентрации кислоты.

Извлечение свинца и цинка в раствор хлоридом натрия характеризуется асимметрией графиков с пересечением в области значений 120 г/дм³.

Соотношение жидкого и твердого вещества влияет на извлечение металлов в раствор. Если для цинка этот показатель остается практически неизменным, то для свинца

он резко увеличивается. Если для свинца интенсивность извлечения со временем увеличивается, то для цинка она заметно уменьшается. Графики извлечения по направленности совпадают при существенно большей активности цинка. Графики извлечения свинца и цинка в раствор хлоридом натрия характеризуется асимметрией с пересечением в области значений 140 г/дм³.

Параметры извлечения металлов в дезинтеграторе в зависимости от соотношения жидкого и твердого веществ имеют различную направленность, причем более активен свинец.

Графики извлечения металлов в дезинтеграторе в зависимости от скорости вращения обладают одинаковой направленностью, причем приращение активности имеет одинаковую для обоих величину.

Полученные результаты позволяют охарактеризовать процессы выщелачивания:

- активация сырья в дезинтеграторе с последующим выщелачиванием вне его по сравнению с традиционным выщелачиванием увеличивает извлечение из хвостов обогащения: по свинцу – в 1,36 раза, по цинку – в 1,13 раза;
- активация сырья в дезинтеграторе одновременно с выщелачиванием по сравнению с вариантом раздельной активации и выщелачивания увеличивает извлечение на величину в первые проценты за на 2 порядка меньшее время.

Результаты исследования: извлечение металлов в раствор практически совпадает с достигнутым максимальным:

- при агитационном выщелачивании хвостов;
- при агитационном выщелачивании хвостов, предварительно подвергнутых активации в дезинтеграторе вместе с выщелачивающими растворами;
- при многократном выщелачивании хвостов в дезинтеграторе.

При агитационном выщелачивании хвостов, активированных в сухом состоянии, или при однократном выщелачивании хвостов в дезинтеграторе в раствор переходит меньшее количество металлов.

Извлечение металлов в раствор практически одинаково как при многократном пропускании через дезинтегратор, так и при агитационном выщелачивании, или агитационном выщелачивании хвостов или руды, предварительно подвергнутых активации в дезинтеграторе с выщелачивающими растворами.

На извлечение металлов в раствор наибольшее влияние оказывает содержание в выщелачивающем растворе хлорида натрия. Далее в порядке убывания следуют: содержание в выщелачивающем растворе серной кислоты, частота вращения роторов дезинтегратора и число циклов пропускания выщелачиваемой пульпы через дезинтегратор или соотношение Ж : Т.

Из исследованных хвостов обогащения цинк выщелачивается легче, чем свинец.

Из регулируемых параметров механохимического выщелачивания наибольшее влияние на процесс оказывает время выщелачивания. Средние значения содержания свинца и цинка в продуктивных растворах близки к максимальным и практически совпадают:

- при агитационном выщелачивании хвостов и руды;
- при агитационном выщелачивании хвостов или руды, предварительно подвергнутых активации в дезинтеграторе совместно с выщелачивающими растворами;
- при выщелачивании хвостов или руды при активации

в ходе многократного пропускания вместе с выщелачивающими растворами через дезинтегратор.

Обсуждение результатов

Результаты исследования позволяют утверждать:

- процесс перевода металлов в раствор адекватен и управляем;
- подготовка руд для выщелачивания имеет отличительные особенности;
- добыча металлов выщелачиванием забалансовых руд эффективна при соблюдении определенного соотношения объемов добычи балансовых и забалансовых руд.

Перспективы комбинированных технологий связаны в первую очередь с диверсификацией горного производства. Тенденция увеличения объемов переработки некондиционного сырья выщелачиванием показана в табл. 4.

Таблица 4
Объекты выщелачивания цветных металлов

Table 4
Sites for leaching of non-ferrous metals

Металл	Месторождение, технология	Регион
Медь	Техногенные месторождения	Свердловская обл. (2)
		Мурманская обл. (1)
		Красноярский край (1)
	Гумешевское, подземное выщелачивание	Свердловская обл.
Никель-кобальт	Аллареченское	Мурманская обл.
	Хвостохранилище №1	Красноярский край
	Озеро Барьерное	
Цинк	Шлакоотвал	Свердловская обл.
Олово	Техногенные месторождения	–
	Барун-Нарынское	Бурятия
Вольфрам	Спокойнинское	Забайкальский край
Молибден с ураном	Стрельцовское, подземное и кучное выщелачивание	Читинская обл.
Титан	Кручининское, перспектива скважинного выщелачивания	Забайкальский край

Добыча руд и впредь будет характеризоваться увеличением объема производства, уменьшением содержания металлов и усложнением условий отработки месторождений с увеличением глубины работ. Воздействие горного производства на окружающую среду будет усиливаться прежде всего за счет химизации продуктами переработки сырья.

В результате обработки минералов по дезинтеграторной технологии создаются активные рабочие плоскости и ослабляются межмолекулярные связи. Свойства материалов изменяются во время физико-химических процессов разделения и концентрирования компонентов минералов.

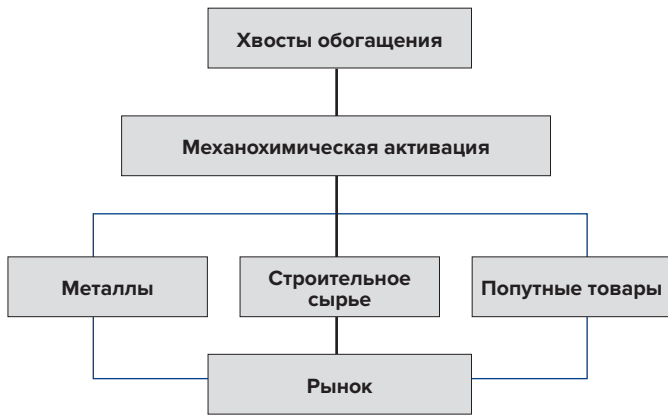


Рис. 5
Схема получения новых материалов на основе хвостов обогащения

Fig. 5
A block diagram of obtaining new materials based using mill tailings

Изменение свойств исходных материалов позволяет создать единую систему ресурсосбережения (рис. 5).

Кроме металлических продуктов выщелачивания хвостов обогащения, товарными продуктами являются: песок для строительной индустрии, низкотемпературного каменного литья и изготовления стекла, иловая фракция и др.

Извлечение металлов при механохимической обработке в интервале от 60 до 90% от исходной величины существенно превышает извлечение при переработке отходов традиционными технологиями (до 45%). Важным свойством является возможность извлечения металлов до безопасного по санитарным требованиям уровня.

Для горной промышленности представляет интерес важный аспект рассматриваемой проблемы. Активация в дезинтеграторе в процессе выщелачивания металлов повышает прочность бетонных смесей. Изменение прочности выщелоченных хвостов в смеси с цементом во времени при неизменном количестве ингредиентов приведено в табл. 5.

Таблица 5
Прочность смеси с цементом в зависимости от варианта активации хвостов

Table 5
Strength of the mixture with cement depending on the tailings activation option

Вариант активации	Прочность, МПа, продолжительность, сутки		
	7	14	28
Агитационное выщелачивание	1,04	1,11	1,20
Агитационное выщелачивание после механической активации	1,16	1,25	1,32
Выщелачивание в дезинтеграторе с механохимической активацией	0,68	0,73	0,88

Примечание: состав смеси, кг/м³: хвосты 1445, цемент 10, вода 380.

Таблица 6
Прочность смеси без цемента в зависимости от варианта активации хвостов

Table 6
Strength of the mixture without cement depending on the option of tailings activation

Вариант активации	Прочность, МПа, продолжительность, сутки		
	7	14	28
Агитационное выщелачивание	0,64	0,81	1,01
Агитационное выщелачивание после механической активации	0,86	0,95	1,12
Однократное выщелачивание в дезинтеграторе механохимической активацией	0,60	0,69	0,78

Примечание: состав смеси, кг/м³: хвосты 1445, цемент 10, вода 380.

Та же закономерность прослеживается и при изготовлении бесцементных смесей на основе вторичных хвостов как в качестве заполнителя, так и в качестве вяжущего (табл. 6).

Активация хвостов обогащения повышает прочность смесей на их основе при одинаковом расходе цемента на 10%, а бесцементная смесь после дезинтегратора по прочности сравнима со смесью при среднем расходе цемента по традиционной технологии.

Предложения по направлению будущих исследований

Достижения в области выщелачивания металлов из некондиционного для традиционных технологий сырья заслуживают реализации на современных предприятиях для выживания в условиях депрессии на ряде предприятий.

Как и любое новое начинание, технологии механохимической активации процессов выщелачивания требуют совершенствования все составляющие ее элементы – от подготовки хвостов выщелачивания и руд до утилизации твердых и жидких вторичных хвостов переработки.

Способы интенсификации процессов выщелачивания включают в себя: химическое воздействие окислителями, поверхностно-активными веществами, бактериями; физическое воздействие электромагнитными полями, давлением или вакуумом, повышение температуры, воздействие взрывом и т.п.; подача окислителей пирита или пиролюзита и др.

Показатель извлечения основных полезных ископаемых составляет 65–78%, а попутных элементов в цветной металлургии – от 10 до 30%.

Наличие таких резервов определяет перспективы использования технологии для переработки техногенных запасов на предприятиях, эксплуатирующих месторождения вскрываемых руд, прежде всего меди, золота, урана и др.

Отходы медной подотрасли Урала объединяют 220 млн т хвостов обогащения с содержанием меди 0,34–0,37%, которое близко к кондиционному значению 0,35–0,5%.

Хвосты обогащения медно-никелевых руд Норильского рудного узла содержат промышленные для современных технологий концентрации платиноидов, золота и серебра. На Тырнаузском вольфрамово-молибденовом месторождении кондиционными считаются руды с содержанием более 0,1% триоксида вольфрама, а в хвостах его содержание превышает 0,04%.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы при проектировании горных предприятий, преподавании горных и геологических дисциплин в вузах и практической инженерной работе. Они корреспондируют с выводами российских и зарубежных исследователей данного направления горного дела [14–17].

Заключение

Обобщение и детализация теории и практики извлечения металлов выщелачиванием из некондиционного сырья в дезинтеграторах является звеном концепции перевооружения горного производства.

Вовлечение в производство некондиционных минеральных ресурсов формирует сырьевую базу для промышленности и избавляет от необходимости разведки и освоения новых месторождений.

Механохимическая активация процессов выщелачивания в дезинтеграторе обеспечивает извлечение из хвостов обогащения от 50 до 80% металлов.

Полнота извлечения металлов из материалов адекватно зависит от типа и количества реагентов, соотношения жидкой и твердой компонент и скорости обработки в дезинтеграторе, что позволяет управлять процессом с получением продуктов нужного качества.

Освоение техногенных месторождений инновационными технологиями с выщелачиванием металлов является реальным шагом по пути расширения минерально-сырьевой базы металлургии и улучшения экологической обстановки в горнодобывающих регионах.

Список литературы / References

1. Малышев Ю.Н., Ряховский В.М., Банников В.Ф., Ряховская С.К. Минералого-геохимические исследования – действенный инструмент совершенствования технологии переработки техногенных отходов. *Горный журнал*. 2016;(1):73–76. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.01.15>
Malyshev Yu.N., Ryakhovsky V.M., Bannikov V.F., Ryakhovskaya S.K. Mineralogy and geochemistry research – An efficient tool of improvement of mining waste processing technology. *Gornyi Zhurnal*. 2016;(1):73–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.01.15>
2. Малышев Ю.Н., Титова А.В. Твердые отходы промышленности – как основа формирования дополнительной минерально-сырьевой базы стратегического сырья РФ. *Маркшейдерия и недропользование*. 2014;(1):23–32.
Malyshev Yu.N., Titova A.V. Solid mine wastes as a foundation of the supplementary mineral and raw materials base of strategic materials in Russia. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2014;(1):23–32. (In Russ.)
3. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyshev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the Mizur mining and processing plant. *Metallurgist*. 2023;66(11-12):1476–1480. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01462-y>
4. Титова А.В., Наумов Г.Б. Экологические проблемы современности. *Горная промышленность*. 2018;(2):75–78.
Titova A.V., Naumov G.B. Environmental problems of the present. *Russian Mining Industry*. 2018;(2):75–78. (In Russ.)
5. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020;37(5):1385–1399. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>
6. Ключев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В. Комплексный анализ генетических особенностей минерального вещества и технологических свойств полезных компонентов Дзезказганского месторождения. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2019;11(3):321–330.
Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V. Complex analysis of genetic features of mineral substance and technological properties of useful components of Dzhezkazgan deposit. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2019;11(3):321–330. (In Russ.)
7. Пухова В.П., Воропанова Л.А. Очистка сточных вод горно-перерабатывающих предприятий путем использования природных продуктов. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2019;11(2):134–141.
Pukhova V.P., Voropanova L.A. Wastewater treatment of mining and processing plants using the natural products. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2019;11(2):134–141. (In Russ.)
8. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Вандышев А.М. Кафедре горного дела УГТУ – 100 лет. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020;(8):130–143. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-130-143>
Valiev N.G., Propp V.D., Vandyshv A.M. The 100th anniversary of the department of mining engineering of URSMU. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2020;(8):130–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-130-143>

9. Lyashenko V.I., Dudchenko A.H., Rakhmanov R.A. Scientific and methodological support and technical maintenance for drilling and blasting preparation of rock ores for underground block leaching. *Explosion Technology*. 2020;(127/84):102–134.
10. Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., Golev A. Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*. 2019;9(5):286. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
11. Yang Y., Qiu W., Liu Z., Song J., Wu J., Dou Z. et al. Quantifying the impact of mineralogical heterogeneity on reactive transport modeling of CO₂ + O₂ in-situ leaching of uranium. *Acta Geochimica*. 2022;41:50–63. <https://doi.org/10.1007/s11631-021-00502-1>
12. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*. 2023;67(3-4):398–408. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01526-z>
13. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):405–415. Rybak Ya., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):405–415. (In Russ.)
14. Adero N.J., Drebenstedt C., Prokofeva E.N., Vostrikov A.V. Spatial data and technologies for geomonitoring of land use under aspect of mineral resource sector development. *Eurasian Mining*. 2020;(1):69–74. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.14>
15. Yin S., Shao Y., Wu A., Wang H., Liu X., Wang Y. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China. *Journal of Cleaner Production*. 2020;247:119590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119590>
16. Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(11):30–36. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2883> Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva 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>
17. Xie H., Zhao J.W., Zhou W., Ren S.H., Zhang R.X. Secondary utilizations and perspectives of mined underground space. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020;96:103129. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103129>

Информация об авторах

Гolik Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: vi.golik@mail.ru

Титова Ася Владимировна – доктор технических наук, заместитель директора по развитию, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: vikt_s@mail.ru

Information about the authors

Vladimir I. Golik – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metallurgy of Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>, e-mail: vi.golik@mail.ru

Asya V. Titova – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Development, V.I. Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: vikt_s@mail.ru

Article info

Received: 29.03.2024

Revised: 13.05.2024

Accepted: 18.05.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.03.2024

Поступила после рецензирования: 13.05.2024

Принята к публикации: 18.05.2024