

# Перспективы увеличения минеральной базы цветной металлургии

А.В. Титова<sup>1</sup>✉, В.И. Голик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Северо-Кавказский государственный технологический университет, г. Владикавказ, Российская Федерация

✉ vikt\_s@mail.ru

**Резюме:** Актуальность исследований по модернизации технологий добычи металлов объясняется снижением уровня обеспеченности минеральными ресурсами из-за несоответствия традиционных технологий разработки условиям рынка. Традиционные технологии переработки руд характеризуются накоплением хвостов переработки. 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. Целью исследования является разработка новых технологий с оптимизацией по критерию полноты использования некондиционного сырья в виде отходов первичной переработки руд. Эффективность технологий с выщелачиванием доказывается комплексным методом, включающим в себя эксперименты и расчеты с сопоставлением показателей вариантов переработки по критерию извлечения металлов методом Венкена-Бокса и интерпретацией результатов в форме логарифмической или полиномиальной интерполяции. Получены количественные значения и выполнены графики зависимости извлечения металла от участвующих факторов, которые позволяют характеризовать процессы выщелачивания в дезинтеграторе полиметаллов и железистых кварцитов. Доказано, что при механохимической обработке извлечение металлов превышает извлечение при переработке отходов традиционными технологиями (до 45%) с обеспечением безопасного по санитарным требованиям уровня. Определено, что активация в дезинтеграторе в процессе выщелачивания металлов повышает прочность бетонных смесей на основе вторичных хвостов, как в качестве заполнителя, так и в качестве вяжущего. Сделан вывод, что активация процессов выщелачивания в дезинтеграторе обеспечивает извлечение из хвостов обогащения от 50 до 80% недоступных для традиционной технологии 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 без образования новых хвостов.

**Ключевые слова:** минерально-сырьевая база, отходы обогащения, руда, выщелачивание, дезинтегратор, механохимическая обработка, извлечение металлов, прочность бетона, безотходная переработка

**Для цитирования:** Титова А.В., Голик В.И. Перспективы увеличения минеральной базы цветной металлургии. *Горная промышленность*. 2021;(1):61–68. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-61-68.

## Prospects for Increasing Mineral Resource Base of Non-Ferrous Metals Industry

A.V. Titova<sup>1</sup>✉, V.I. Golik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> North-Caucasus State University of Technology, Vladikavkaz, Russian Federation

✉ vikt\_s@mail.ru

**Abstract:** The importance of research into enhancing the metal mining technologies is justified by the declining availability of mineral resources due to non-compliance of the conventional mining methods with the market conditions. The traditional ore processing technologies are accompanied by accumulation of processing tailings. Zero-waste recycling of primary processing waste, which is often used without extracting metals to match the sanitary standards, is not evolving. The acute environmental issues are primarily exacerbated by a lack of levers for centralized accounting and management of the accumulated waste. The aim of the study is to develop new technologies that are optimized in terms of complete utilization of the off-grade raw materials i.e. wastes from primary ore processing. The effectiveness of leaching technologies is proved with a complex method that involves experiments and calculations comparing the performance of processing options using the Box-Behnken design of metal extraction and interpreting the results in the form of logarithmic or polynomial interpolation. Quantitative values were obtained and cross-plots of metal extraction dependence on the contributing factors were made, which allow characterizing the leaching processes of polymetals and ferruginous quartzites in the disintegrator. It has been proved that mechanochemical treatment provides higher metal yield (up to 45%) than traditional waste processing technologies while securing a safety level that meets the sanitary requirements. It has also been determined that disintegrator activation during the metal leaching process increases the strength of concrete mixtures based on re-treated tailings, both as aggregates and as a binder. A conclusion is made that activation of the leaching processes in a disintegrator ensures the extraction of 50 to 80% of metals that are not available for extraction from mill tailing with conventional technologies. Development of man-made deposits using innovative technologies

based on metal leaching is a real step towards expanding the mineral resource base of the metallurgical industry and improving the environmental situation in the mining regions. In contrast to technologies of a similar scope and purpose, the proposed technology makes it possible to process ores in a zero-waste manner without creating new tailings.

**Keywords:** mineral resource base, mill tailings, ore, leaching, disintegrator, mechanochemical treatment, metal extraction, concrete strength, zero-waste processing

**For citation:** Titova A.V., Golik V.I. Prospects for Increasing Mineral Resource Base of Non-Ferrous Metals Industry. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(1):61–68. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-61-68.

**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%, когда 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).

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, которые 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 себе минерально-сырьевую национальную безопасность. Экспортируются не добываемые металлы, а полуфабрикаты – продукты переделов руд, в том числе свинца, вольфрама, цинка и других 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-прежнему потребность 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 использует-

**Таблица 1**  
Показатели образования отходов при добыче и переработке металлов

**Table 1**  
Waste generation rates in metal mining and processing

Полезный продукт, 1 тонна	Отходы	
	в процессе добычи, т	в процессе переработки, т
Уголь	3	0,2–0,3
Сталь	5–6	0,5–0,7
Цветные металлы	100–150	50–60
Редкие, благородные и радиоактивные металлы	5–10 тыс. т	10–100 тыс. т

Актуальность исследования путей модернизации технологий добычи металлов объясняется снижением уровня обеспеченности минеральными ресурсами из-за несоответствия традиционных технологий разработки

ся 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 начаты освоением во второй половине прошлого века. В настоящее время Приаргунский горно-химический комбинат способами выщелачивания производит более 30% продукции.

**Методы**

Эффективность технологий с выщелачиванием доказывалась 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 ГОК 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 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, Гц: 50, 125, 200;
- 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 часа 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 производственный раствор извлекается большее количество минеральных веществ, чем при агитационном выщелачивании (табл. 3).

Большее извлечение металлов из крупных фракций сырья и производительность при меньшей крупности продолжительности выщелачивания характерно 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 пере-

менным является один параметр, а остальным параметрам придают средние значения в интервалах, например, для Садонских руд: содержание  $H_2SO_4$ , г/дм<sup>3</sup>, 6; содержание соли, г/дм<sup>3</sup>, 90; соотношение жидкого и твердого 7; время выщелачивания, ч, 0,625; скорость вращения роторов, Гц, 125.

Таблица 3  
Показатели вариантов выщелачивания хвостов обогащения

Table 3  
Indicators of tailings leaching options

Вариант активации	Остаток во вторичных хвостах, %					
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	K <sub>2</sub> O	P	Ca	Mg O
Агитационное выщелачивание	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
Однократное выщелачивание в дезинтеграторе	3,7	2,3	0,2	0,06	0,20	0,11
Агитационное выщелачивание после выщелачивания в дезинтеграторе	3,5	2,2	0,2	0,05	0,19	0,10
Трехкратное выщелачивание в дезинтеграторе	3,0	1,9	0,2	0,04	0	0,09

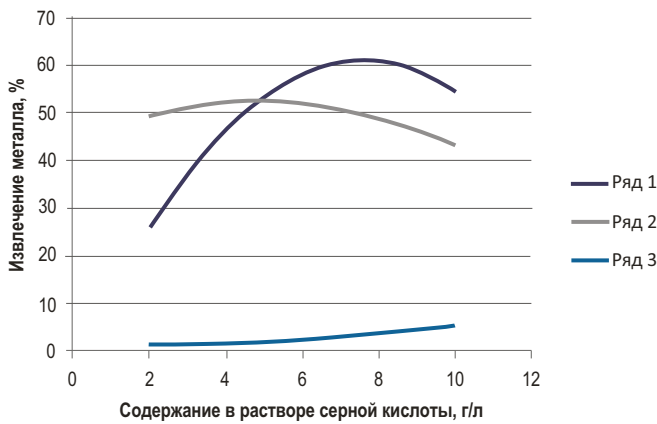


Рис. 1  
Зависимость извлечения металла от содержания в растворе серной кислоты: ряд 1 – извлечение в производственный раствор цинка; ряд 2 – извлечение в производственный раствор свинца; 3 – извлечение в производственный раствор железа

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

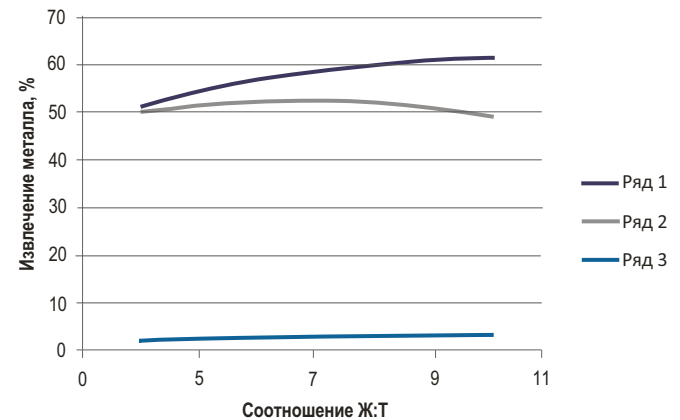


Рис. 3  
Зависимость извлечения металла от соотношения твердой и жидкой фаз

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

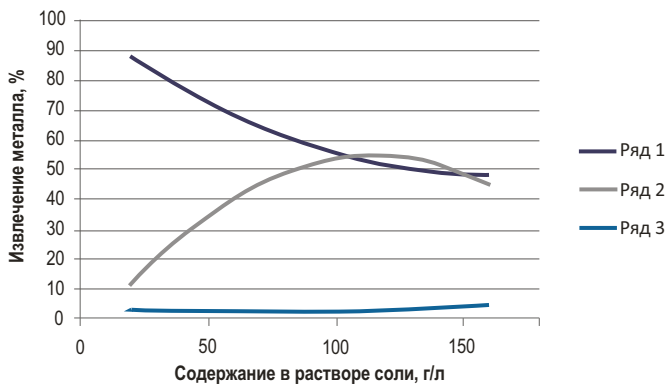


Рис. 2  
Зависимость извлечения металла от содержания в растворе соли

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

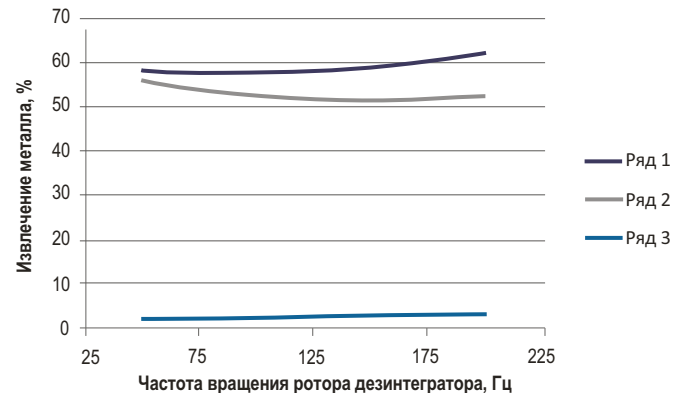


Рис. 4  
Зависимость извлечения металла от частоты вращения роторов дезинтегратора

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

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/дм<sup>3</sup>.

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/дм<sup>3</sup>.

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 обеих величину.

Полученные результаты позволяют характеризовать 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 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 представлена в табл. 4.

**Таблица 4**  
Объекты выщелачивания  
цветных металлов

**Table 4**  
Leaching facilities  
for 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	–
Вольфрам	Барун-Нарынское	Бурятия
	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 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.

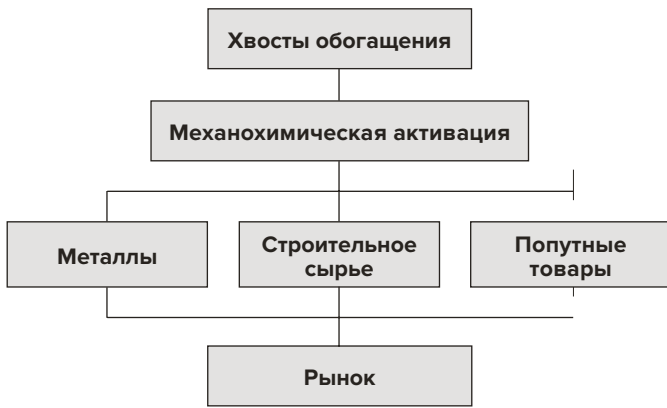


Рис. 5  
Схема получения новых материалов на основе хвостов обогащения

Fig. 5  
Scheme for obtaining new materials from 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 дано в табл. 5.

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 сегодняшних предприятиях для выживания в условиях депрессии на ряде предприятий.

Как у любого нового начинания, у 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 Тырныаузском вольфрамowo-молибденовом месторождении кондиционными считаются руды с содержанием более 0,1% триоксида вольфрама, а в хвостах его содержание превышает 0,04%.

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, время, сутки		
	7	14	28
Агитационное выщелачивание	1,04	1,11	1,20
Агитационное выщелачивание после механической активации	1,16	1,25	1,32
Однократное выщелачивание в дезинтеграторе	0,68	0,73	0,88
Агитационное выщелачивание после выщелачивания в дезинтеграторе	0,73	0,77	0,94
Трехкратное выщелачивание в дезинтеграторе	1,12	1,20	1,32

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, время, 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	0,60	0,69	0,78
Агитационное выщелачивание после выщелачивания в дезинтеграторе	0,63	0,71	0,84
Трехкратное выщелачивание в дезинтеграторе	0,82	1,00	1,12

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

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 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

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. DOI: 10.17580/gzh.2016.01.15.
2. Малышев Ю.Н., Титова А.В. Твердые отходы горной промышленности – как основа формирования дополнительной минерально-сырьевой базы стратегического сырья РФ. *Маркшейдерия и недропользование*. 2014;(1):23–32.
3. Голик В.И., Полухин О.Н., Петин А.Н., Комашенко В.И. Экологические проблемы разработки рудных месторождений КМА. *Горный журнал*. 2013;(4):91–94. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1165/article/19742/>
4. Титова А.В., Наумов Г.Б. Экологические проблемы современности. *Горная промышленность*. 2018;(2):75–78. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-2-138-75-78.
5. Рыльникова М.В., Емельяненко Е.А., Ангелова Е.И. Эффективность действия технического лигносульфоната при выщелачивании старогодних отходов переработки медно-колчеданных руд. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета*. 2013;(2):19–21.
6. Комашенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2015;(4):23–30.
7. Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А., Гапонова И.В. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов. *Горный журнал*. 2017;(12):46–51. DOI: 10.17580/gzh.2017.12.09.
8. Секисов А.Г., Шевченко Ю.С., Лавров А.Ю. Взрывоинъекционная подготовка руд к выщелачиванию. В: *Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых, г. Новосибирск, 9–12 октября 2012 г.* Новосибирск; 2012. Т. 1. С. 283–287.
9. Lyashenko V.I., Dudchenko A.N., 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;9:1–13. DOI: 10.3390/min9050286.
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;(2):283–290
12. Голик В.И., Комашенко В.И. Отходы обогащения железистых кварцитов как сырье для доизвлечения металлов и использования в качестве закладочных смесей. *Горный журнал*. 2017;(3):43–47. DOI: 10.17580/GZH.2017.03.08.
13. Бабкин В.В., Успенский Д.Д. Новая стратегия. Химия-2030. *Высокие переделы сырья. Кластеризация. Химизация индустрии РФ*. М.: Лика; 2015. 222 с.
14. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of GEOMATE*. 2016;10(1):1693–1697. DOI: 10.21660/2016.19.5327.
15. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. *Resources Policy*. 2017;52:7–18. DOI: 10.1016/j.resourpol.2017.01.011.
16. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017;61:40–57. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.019.
17. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvão F., Bettencourt J. S., Tomi de G. Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting. Part I. *REM: Revista Escola de Minas*. 2015;68(3):337–342. DOI: 10.1590/0370-44672014680218.

### References

1. 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.) DOI: 10.17580/gzh.2016.01.15.
2. 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. *Marksheideriya i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2014;(1):23–32. (In Russ.)
3. Golik V.I., Polukhin O.N., Petin A.N., Komashenko V.I. Environmental problems of working out of ore deposits of Kursk Magnetic Anomaly. *Gornyi Zhurnal*. 2013;(4):91–94. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1165/article/19742/>

4. Titova A.V., Naumov G.B. Environmental problems of the present. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2018;(2):75–78. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2018-2-138-75-78.
5. Rylnikova M.V., Emelianenko E.A., Angelova E.I. The effectiveness of the technical lignosulphonate leaching stale wastes from copper pyrite ores. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013;(2):19–21. (In Russ.)
6. Komashchenko V.I. Environmental-economical expediency of utilizing mining-industrial wastes for their converting. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2015;(4):23–30. (In Russ.)
7. Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., Gaponova I.V. Enhancing mine production efficiency through waste management. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(12):46–51. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2017.12.09.
8. Sekisov A.G., Shevchenko Yu.S., Lavrov A.Yu. Explosion injection approach to ore preparation to leaching. In: *Fundamental Issues of Anthropogenic Geo-Environmental Formation: Proceedings of All-Russian Conference with Participation of Foreign Researchers, Novosibirsk, October 9–12 2012*. Novosibirsk; 2012. Vol. 1, pp. 283–287. (In Russ.)
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;9:1–13. DOI: 10.3390/min9050286.
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. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;(2):283–290. (In Russ.)
12. Golik V.I., Komashchenko V.I. Ferruginous quartzite processing waste as a source of additional metal recovery and backfilling. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(3):43–47. (In Russ.) DOI: 10.17580/GZH.2017.03.08.
13. Babkin V.V., Uspenskiy D.D. *A New Strategy. Chemistry 2030. High Conversion of Raw Materials. Clustering. Chemicalization of Industry in the Russian Federation*. Moscow: Lika; 2015. 222 p. (In Russ.)
14. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of GEOMATE*. 2016;10(1):1693–1697. DOI: 10.21660/2016.19.5327.
15. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. *Resources Policy*. 2017;52:7–18. DOI: 10.1016/j.resourpol.2017.01.011.
16. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017;61:40–57. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.019.
17. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvão F., Bettencourt J. S., Tomi de G. Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting. Part I. *REM: Revista Escola de Minas*. 2015;68(3):337–342. DOI: 10.1590/0370-44672014680218.

**Информация об авторах**

**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

**Голик Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры горного дела, Северо-Кавказский государственный технологический университет, г. Владикавказ, Российская Федерация; e-mail: v.i.golik@mail.ru

**Information about the authors**

**Asya V. Titova** – Doctor of Technical Sciences, Deputy Director on Development, Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: info@sgm.ru

**Vladimir I. Golik** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mining, North-Caucasus State University of Technology, Vladikavkaz, Russian Federation; e-mail: v.i.golik@mail.ru

**Article info:**

Received: 12.01.2021

Revised: 19.01.2021

Accepted: 08.02.2021

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 12.01.2021

Поступила после рецензирования: 19.01.2021

Принята к публикации: 08.02.2021