

УДК 504.55.054:622(470.6)

К КОНЦЕПЦИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

Комащенко Виталий Иванович¹,
komashchenko@inbox.ru

Воробьев Евгений Дмитриевич¹,
vorobev@bsu.edu.ru

Разоренов Юрий Иванович²,
yiri1963@mail.ru

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

² Южно-Российский государственный политехнический университет,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Актуальность. Поскольку современное обогащение не позволяет достичь полного раскрытия минералов, они совершенствуются за счет дополнительных операций механической и химической переработки, что значительно повышает эффективность извлечения. Поэтому данное направление является актуальным за счет утилизации больших объемов некондиционного сырья путем выщелачивания металлов.

Целью исследования является развитие концепции механохимического выщелачивания отходов добычи и переработки вскрываемых руд.

Методы исследования: критический анализ передового опыта разработки аналогичных месторождений по материалам публикаций, лабораторные исследования процессов в дезинтеграторной установке. **Объект исследования:** комбинированное выщелачивание металлов из отходов производства с помощью химических реагентов в дезинтеграторе.

Результаты исследования. Уточнена концепция извлечения металлов методом механохимической активации. Подтверждено, что механохимическая активация дает возможность не только извлечь полезные компоненты из отходов, но и довести их до требуемых стандартов. Предложена эколого-математическая модель эффективной оценки извлечения черных и цветных металлов из отходов обогащения руд. Уточнены показатели извлечения металлов из отходов обогащения металлических руд. Рекомендована технология утилизации отходов обогащения руд, позволяющая уменьшить объем хранилищ хвостов с получением экономического эффекта. Предложен способ расширения минерально-сырьевой базы предприятий путем воспроизводства сырья.

Выводы. Извлечение металлов до уровня неограниченного использования традиционными методами невозможно и обладает перспективами улучшения при комбинировании с химическими технологиями. Безотходное извлечение металлов возможно при использовании высокой энергии активации в аппаратах типа дезинтегратор. Практическое использование механохимической технологии извлечения вскрываемых металлов из хвостов переработки является резервом расширения сырьевой базы и подъема экономики производства металлов.

Ключевые слова:

Металл, руда, горная масса, извлечение, разрушение, эксперимент, механохимия, выщелачивание, дезинтегратор, воздействие, активация.

Введение

В последние годы научный прогресс горного дела обеспечил многократное увеличение объемов извлечения минерального сырья из недр земли. При этом преобладает практика использования только отдельных компонентов руд с отнесением остальных в отходы.

Преобладающая концепция обращения с отходами переработки минерального сырья исходит из того, что оно является неиспользуемым и опасным ресурсом, использование которого в то же время может обеспечить эколого-экономический эффект.

Возможности большинства традиционных технологий переработки руд ограничены использованием только одной механической энергии. Привлечение методов выщелачивания с использованием еще и химической энергии повышает возможности извлечения металлов, но требует продолжительного времени [1].

В настоящее время человечество поставлено перед необходимостью перехода от выборочной утилизации

наиболее ценных компонентов отходов к организации безотходного использования минерального сырья.

Цель настоящей статьи заключается в развитии концепции механохимического выщелачивания отходов добычи и переработки добычи вскрываемых руд.

Характеристика объекта исследований

Проведенные научные исследования и обобщенный опыт получения металлов из продуктов обогащения подтверждают концепцию актуальности утилизации отходов производства, в которых содержатся опасные компоненты, что необходимо для понижения уровня опасных компонентов в окружающей среде [2].

Глобальная проблема хранения на земной поверхности некондиционного металлосодержащего сырья не решается потому, что металлы не извлекаются полностью до безопасных по санитарным условиям значений [3–5].

Добыча минерального сырья характеризуется прогрессирующим увеличением объемов добычных работ, обусловленных динамичным развитием потребностей населения Земли. Непременным следствием горного производства является накопление отходов добычи и переработки минерального сырья с интенсивным воздействием на среду токсичными химическими компонентами. Радикальной мерой снижения глобальной опасности может быть утилизация опасного и вместе с тем ценного сырья с доведением остаточного содержания хотя бы до фонового уровня. Применяемые методы добычи и переработки руд характеризуются потерей части ценных компонентов в хвостах на всех этапах (рис. 1).

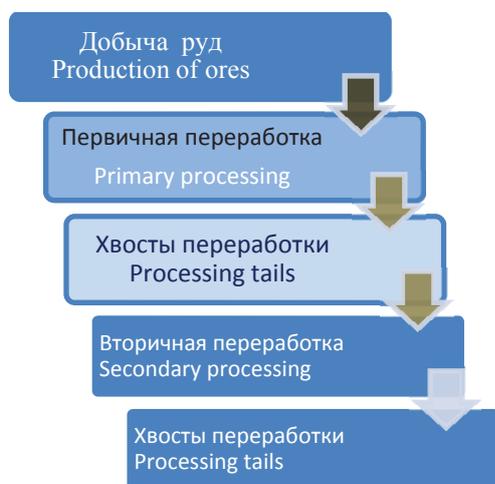


Рис. 1. Схема переработки руд

Fig. 1. Ore processing

Отсутствие технологий полного извлечения металлов из хвостов переработки руд формирует глобальную проблему.

Постановка задания и методика исследований объекта

Безотходное производство металлов нуждается в теоретическом и экспериментальном обосновании инновационного метода, основанного на комбинировании процессов химического выщелачивания и механической активации в дезинтеграторе.

Концепция утилизации хвостов переработки руд включает положения:

- традиционные обогатительные процессы не обеспечивают извлечения металлов до безопасных значений;
- извлечение металлов радикально повышается при использовании других видов применяемой энергии;
- перспективным направлением является сочетание химического выщелачивания и механической активации.

Научное обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности механохимической утилизации хвостов переработки руд является задачей настоящего исследования

Результаты исследований и их анализ

Перспективный этап развития технологий обогащения заключается в извлечении металлов с помощью химических реагентов. При этом металлы под комбинированным воздействием энергий переходят в готовый товарный продукт из раствора. С увеличением кислотности растворов понижение растворимости хлора уменьшает скорость разло-

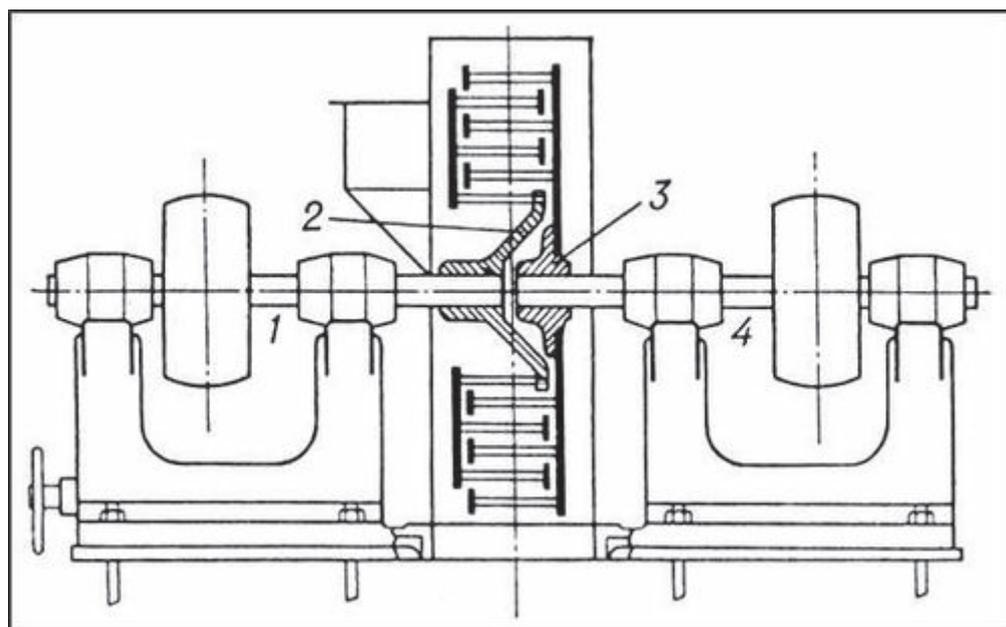


Рис. 2. Схема современного дезинтегратора: 1, 4 – валы; 2, 3 – роторы с пальцами

Fig. 2. Scheme of a modern disintegrator: 1, 4 are the shafts; 2, 3 are the rotors with fingers

жения сульфидных минералов атомарным хлором, кислородом и молекулярным хлором [6].

Новая механохимическая технология основана на феномене активации вещества высокой механической энергией, исследованном в работах эстонского ученого Йоханнеса Хинта [7]. Новые аспекты механохимической технологии открываются при использовании современных дезинтеграторов (рис. 2) [8–10].

Дезинтегратор впервые в мировой горной практике использован в промышленном масштабе на месторождении «Шокпак» (Северный Казахстан) [11]. Дезинтегратор ДУ-65 был укомплектован универсальными ступицами, дающими возможность применять четырех- и трехрядные роторы и двигатели мощностью более 250 кВт. Дезинтегратор обеспечивал выход фракций активного класса до 55 %, а в комбинации с вибро-мельницей – до 70 %, что позволяло активированному доменному шлаку конкурировать с товарным цементом.

Установка располагалась в здании с площадью основания 5–7 м² в трех уровнях. Материал поднимали на верхнюю отметку и через сито с отверстиями 20 мм пропускали в установку.

Применялась мокрая схема измельчения, при которой в дезинтегратор подавали воду, а продукты активации к месту использования направляли в виде пульпы. Приращение активности вяжущего по сравнению с базовым вариантом достигало 40 %.

В дальнейшем дезинтегратор стали использовать для комбинированной одновременно механической и химической активации процесса извлечения металлов. Вместе с измельченной минеральной массой в камеру дезинтегратора стали подавать реагент – анолит электрохимической очистки шахтных вод, который под действием высокой энергии запрессовывался в микротрещины и переводил металлы в раствор практически мгновенно (рис. 3) [12].

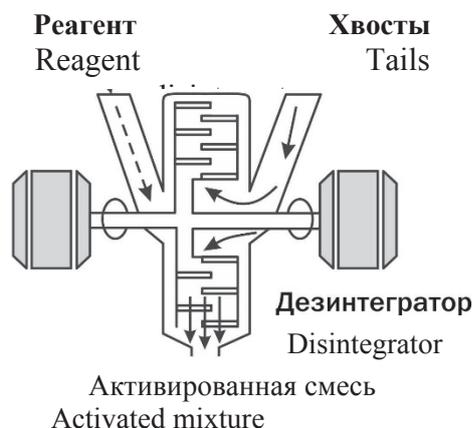


Рис. 3. Схема механохимической активации хвостов в дезинтеграторе

Fig. 3. Scheme of mechanochemical activation of tails in a disintegrator

Метод активации получил развитие трудами Северо-Кавказских ученых под научным руководством профессора В.И. Голика в рамках государственных заказов и Федеральных программ.

При постановке лабораторного эксперимента по программе двух государственных заказов нами использованы хвосты обогащения Садонских руд в тяжелых суспензиях с извлечением свинца и серебра 60 %, цинка – 80–85 %. Остаток хвостов – 25–50 % от общего количества обогащаемых руд. При этом химический состав отходов, %: Fe – 4,4; SiO₂ – 31,4; CaO – 1,96; S – 1,88; Ag – 0,015; Cu – 0,18; Mn – 0,015; K₂O – 3,5; Al₂O₃ – 0,8; TiO₂ – 0,03; Zn – 0,95; Pb – 0,84.

Сравнивали варианты извлечения цинка и свинца из отходов переработки:

- агитационное выщелачивание в перколяторе;
- выщелачивание в перколяторе после активации в дезинтеграторе;
- выщелачивание в дезинтеграторе.

При проведении исследований применяли метод математического планирования, с учетом следующих факторов:

- содержание серной кислоты в растворе (X1) 2–6–10 г/л;
- содержание хлорида натрия в растворе (X2) 20–90–160 г/л;
- весовое соотношение массы в растворе и выщелачиваемой массы (X3) в эксперименте (50 г) 4–7–10;
- время выщелачивания ((X4) в пределах 0,15–0,625–1,0 ч.

Извлечение металлов в раствор характеризуются таблицей.

Таблица. Результаты извлечения металлов в раствор

Table. Results of extracting metals in solution

Серии/Series	Свинец/Lead, %	Цинк/Zinc, %
1	24,8	39,2
2	33,9	44,4
3	35,7	46,1
4	13,2	10,3
5	21,5	21,6
6	21,6	21,9

Выщелачивание с активацией в дезинтеграторе оказалось существенно эффективнее, чем агитационное выщелачивание. Активация в дезинтеграторе с выщелачиванием вне его увеличила выход полезных компонентов: по свинцу – в 1,5 раза, по цинку – в 1,2 раза. Варианты с отдельной активацией и выщелачиванием обеспечивают одинаковое извлечение, но при механохимической активации процесс извлечения сокращается с 15–60 минут до первых секунд, т. е. на 2 порядка.

При проведении лабораторных экспериментов по Федеральной программе в дезинтеграторной установке ДЕЗ-11 утилизировали хвосты обогащения железистых кварцитов Лебединского место-

рождения (Курская магнитная аномалия) с содержанием до 76 % фракций крупностью менее 0,071 мм. Химический состав хвостов, %: SiO₂ – 64; Fe – 8; Al₂O₃ – 5,2; Mn – 3,2; K₂O – 0,7; P – 0,1; Ca – 0,8; Mg O – 0,2; Cu – 5·10⁻³; Ni – 4·10⁻³; Zn – 5·10⁻⁴; As, Ba, Bi, Be, Co, Cr, Li, Nb, Mo, Pb, Sb, Sr, Sn, Ti, V, Y – на уровне (30–50)·10⁻⁵.

Установлено, что механохимическая активация позволяет при однократной обработке из пробы с содержанием 8 % железа, извлекать 1 % железа, а при многократной переработке довести до допустимого по санитарным условиям уровня.

Таким образом, механохимическая активация позволяет даже при однократной обработке увеличивать количество металлов, выделяемых в раствор, а также обладает резервом повышения эффективности извлечения при увеличении количества циклов переработки.

Наконец, в дезинтеграторе выщелочили хвосты обогащения угля с получением металлов, преимущественно молибдена.

Хорошая сходимость результатов механохимического извлечения металлов из разнородного минерального сырья является подтверждением корректности исследований и концепции активации выщелачивания в дезинтеграторе.

Экологическим эффектом утилизации хвостов переработки является исключение необходимости их дальнейшего хранения на земной поверхности с возвращением земли в хозяйственное пользование [13–15].

Модель эффективности использования хвостов имеет вид:

$$\Pi = \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N \{ (M_{ey} \Pi_{my} + Q_y \Pi_{qy}) \} - \sum_{a=1}^3 [K(1 + E_{ny}) + E_q + E_x] - [(M_e \Pi_m + Q \Pi_q) + Q_r \Pi_r] \times [K_c K_y K_r K_g K_{br} K_{\chi}] \rightarrow \max,$$

где P – продукты отходов обогащения; O – типы хвостов; Π – процессы извлечения отходов; T – время извлечения; F – фазы действия хранилищ; N – стадия применения хвостов; M_e – металлы, извлеченные из хвостов; Π_{my} – цена на извлекаемые металлы; Q_y – число восстановлений; Π_{qy} – цена полученных компонентов; E_q – коэффициент процентной ставки на кредит для переработки; E_x – коэффициент процентной ставки на кредит для извлечения металлов; E_{ny} – коэффициент процентной ставки на восстановление геоэкологии; M_e – величина потерянных компонентов; Π_m – цена утерянных металлов; Q – число утерянных эффектов; Π_q – цена потерянных компонентов; Q_r – количество эф-

фектов загрязнения среды; Π_r – затраты на компенсацию восстановления; Z – затраты на содержание аппарата управления; K – затраты на содержание хранилищ; K_c – коэффициент складирования хвостов; K_y – коэффициент потерь продуктов выщелачивания; K_r – коэффициент распространения растворов; K_g – коэффициент воздействия на экосистему; K_r – коэффициент загрязнения близлежащих регионов; K_{br} – временной коэффициент опасности среды; K_χ – коэффициент риска загрязнения окружающей среды.

Эффективность утилизации хвостов переработки по новой технологии имеет несколько аспектов экономического, экологического и социального плана [16–19].

Механохимическая активация хвостов переработки руд является реальным шагом в направлении комплексного решения одновременно двух проблем глобального значения: обеспечения металлами и утилизации отходов [20].

Их решение может быть обеспечено путем комбинирования технологий извлечения металлов с получением синергетического эффекта большего, чем при раздельном использовании технологий [21].

Для массового освоения механохимической технологии нужны научные продукты, в том числе:

- математическая модель извлечения металлов из некондиционного сырья;
- программное обеспечение механохимических процессов;
- методика определения эколого-экономического эффекта реализации механохимической технологии.

Успех извлечения металлов из хвостов переработки в раствор рождает проблему извлечения их из раствора и отделения тонкодисперсной твердой фазы от жидкой фазы, а также захоронения неиспользуемых минеральных компонентов. Эти проблемы требуют осмысления и решения [22].

Выводы

1. Извлечение металлов до уровня неограниченного использования традиционными методами невозможно и обладает перспективами улучшения при комбинировании с химическими технологиями.
2. Безотходное извлечение металлов возможно при использовании высокой энергии активации в аппаратах типа дезинтегратор.
3. Практическое использование механохимической технологии извлечения вскрываемых металлов из хвостов переработки является резервом расширения сырьевой базы и подъема экономики производства металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков Л.А. Прогноз минерально-энергетического потребления при бескризисном развитии экономики // Горный журнал. – 2014. – № 7. – С. 45–48.
2. Голик В.И., Разоренов Ю.И. Проектирование горных предприятий. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – 262 с.
3. Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes / D. Franks, D. Boger, C. Côte, D. Mulligan // Resources Policy. – 2011. – V. 36. – № 2. – P. 114–122.
4. Экологические проблемы разработки рудных месторождений КМА / В.И. Голик, О.Н. Полухин, А.Н. Петин, В.И. Комащенко // Горный журнал. – 2013. – № 4. – С. 91–98.
5. Mwase J.M., Petersen J., Eksteen J.J. A conceptual flowsheet for heap leaching of platinum group metals (PGMs) from a low-grade ore concentrate // Mining Engineering & Metallurgical Engineering, Hydrometallurgy. – 2012. – V. 111–112. – P. 129–135.
6. Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental Study of Non-Waste Recycling Tailings Ferruginous Quartzite // Research India Publications. – 2015. – № 15. – P. 35410–35416.
7. Комащенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 23–30.
8. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля / В.И. Голик, В.И. Комащенко, С.Г. Страданченко, С.А. Масленников // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 91–95.
9. Numerical study of the interaction between adjacent galleries in a high-level radioactive waste repository / L. Chen, G. Duveau, A. Poutrel, Y. Jia, J.F. Shao, N. Xie // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2014. – V. 71. – P. 405–417.
10. Голик В.И., Комащенко В.И. Отходы обогащения железистых кварцитов как сырье для доизвлечения металлов и использования в качестве закладочных смесей // Горный журнал. – 2017. – № 3. – С. 43–47. DOI: 10.17580/GZH.2017.03.08.
11. Karimi N.S., Atashpanjeh A., Mollaei F.M.R. Design considerations of heap leaching at the sarcheshmeh copper open pit mine // International Mining Congress of Turkey. – Turkey, 2001. – P. 513–516.
12. Concrete Activation in Disintegrator during Mine Shaft Fixing / S.G. Stradanchenko, S.A. Maslennikov, E.V. Shevchenko, V.I. Golik, Y.I. Razorenov // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – № 11. – P. 1191–1195.
13. Стратегия снижения риска опасного загрязнения окружающей среды на открытых разработках / Б.П. Ракишев, Д.М. Сиваракша, С.К. Молдабаев, Н.А. Шулаева // Горный журнал Казахстана. – 2010. – № 6. – С. 36–39.
14. Backman C.M. Global supply and demand of metals in the future // Journal of Toxicology and Environmental Health. – 2008. – № 71. – P. 1244–1253.
15. Golik V.I., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the Economic Foundations of Depressive Mining Region // Medwell Journals. The Social Sciences. – 2015. – № 10 (5). – P. 678–681.
16. Язиков В.Г. Перспективы развития урановой промышленности Республики Казахстан // Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: сборник статей. Т. 1: Уран. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2005. – С. 67–76.
17. He Manchao, Xie Heping, Peng Suping. Study on rock mechanics in deep mining engineering // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2005. – № 16. – P. 2804–2813.
18. Gattinoni P., Pizzarotti E., Scesi L. Engineering Geology for Underground Works. – Heidelberg: Springer, 2014. – 312 p.
19. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, С.Г. Страданченко, З.М. Хашева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 6–14.
20. Golik V.I., Hasheva Z.M. Economical Efficiency of Utilization of Allied Mining Enterprises Waste // Medwell Journals. The Social Sciences. – 2015. – № 10 (5). – P. 682–686.
21. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management / T. Prior, D. Giurco, G. Mudd, L. Mason, J. Behrisch // Global Environmental Change. – 2012. – № 22. – P. 577–587.
22. Каплунов Д.П. Теоретические основы проектирования освоения недр: становление и развитие // Горный журнал. – 2014. – № 7. – С. 49–51.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

Комащенко В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной геологии и горного дела Белгородского государственного национального исследовательского университета.

Воробьев Е.Д., кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геологии и горного дела Белгородского государственного национального исследовательского университета.

Разоренов Ю.И., доктор технических наук, профессор, проректор Южно-Российского государственного политехнического университета.

UDC 504.55.054:622(470.6)

EXTRACTION OF METALS WHEN RECYCLING ENRICHMENT OF ORES

Vitaliy I. Komashchenko¹,

komashchenko@inbox.ru

Evgeniy D. Vorobev¹,

vorobev@bsu.edu.ru

Yury. I. Razorenov²,

yiri1963@mail.ru

¹ Belgorod State National Research University,
85, Pobedy street, Belgorod, 308015, Russia.

² South-Russian state Polytechnic University,
132, St. Prosvescheniya, Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russia.

Relevance. As the enrichment does not allow achieving full disclosure of minerals, they are improved due to additional mechanical operations and chemical processing, which significantly increases the extraction efficiency. Therefore, the direction is relevant due to utilization of large amounts of substandard raw materials by leaching metals.

The aim of the study is to develop the concept of mechanochemical leaching of wastes of mining and processing ores.

Research methods: critical analysis of best practices in development of similar deposits on publications, laboratory studies of processes in disintegrating install.

Object of the study: the combined leaching of metals from waste products using chemical reagents in the cage.

The results of the study. The concept of extraction of metals is specified by the method of mechanochemical activation. It is confirmed that the mechanochemical activation allows not only extracting valuable components from waste, but also bringing them up to the required standards. The authors offered the ecological mathematical model for the effective assessing the extraction of ferrous and non-ferrous metals from waste of ores enrichment. The indicators of metal extraction from tailings of metal ores were ascertained. The technology of recycling ore enrichment allowing us to reduce the volume of storages of tails with receiving economic effect is recommended. The paper introduces the method of expanding the mineral resource base of the enterprises by production of raw materials.

Conclusions. The extraction of metals to the level of unlimited use by traditional methods is impossible and has the prospects of improvement when combined with chemical technologies. Wasteless extraction of metals is possible with the use of high activation energy in such devices as the disintegrator. The practical use of mechanochemical technology to extract metals from open tailings is a reserve for expanding the raw materials base and recovery of metals production.

Key words:

Metal, ore, mountain weight, extraction, destruction, experiment, mechanochemistry, leaching, disintegrator, influence, activation.

REFERENCES

1. Puchkov L.A. Forecast of mineral-energetic consumption with the crisis-free development of the economy. *Mountain magazine*, 2014, no. 7, pp. 45–48. In Rus.
2. Golik V.I., Razorenov Yu.I. *Proektirovanie gornyykh predpriyaty* [Design of mining enterprises]. Novocherkassk, SRSTU Press, 2007. 262 p.
3. Franks D., Boger D., Côte C., Mulligan D. Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes. *Resources Policy*, 2011, vol. 36, no. 2, pp. 114–122.
4. Golik V.I., Polukhin O.N., Petin A.N., Komashchenko V.I. Environmental problems of development of ore deposits of KMA. *Mining journal*, 2013, no. 4, pp. 91–98. In Rus.
5. Mwase J.M., Petersen J., Eksteen J.J. A conceptual flowsheet for heap leaching of platinum group metals (PGMs) from a low-grade ore concentrate. *Mining Engineering & Metallurgical Engineering, Hydrometallurgy*, 2012, vol. 111–112, pp. 129–135.
6. Hoevel V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental Study of Non-Waste Recycling Tailings Ferruginous Quartzite. *Research India Publications*, 2015, no. 15, pp. 35410–35416.
7. Komashchenko V. I. Ecological and economic feasibility of utilization of mining wastes for their recycling. *Izvestia of the Tula state University. Earth science*, 2015, no. 4, pp. 23–30. In Rus.
8. Golik V.I., Komashchenko V.I., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A., Increasing the efficiency of the subsoil by deep disposal of waste coal. // *Mountain magazine*. – 2012. No. 9. – S. 91–95. In Rus.
9. Chen L., Duveau G., Poutrel A., Jia Y., Shao J.F., Xie N. Numerical study of the interaction between adjacent galleries in a high-level radioactive waste repository. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, vol. 71, pp. 405–417.
10. Golik V.I., Komashchenko V.I. Ferruginous quartzite processing waste as a source of additional metal recovery and backfilling. *Mountain magazine*, 2017, no. 3, pp. 43–47. DOI: 10.17580/GZH.2017.03.08. In Rus.
11. Karimi N.S., Atashpanjeh A., Mollaei F.M.R. Design considerations of heap leaching at the sarcheshmeh copper open pit mine. *International Mining Congress of Turkey*. Turkey, 2001. pp. 513–516.
12. Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A., Shevchenko E.V., Hoevel V.I., Razorenov Y.I. Concrete Activation in Disintegrator During Mine Shaft Fixing. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, no. 11, pp. 1191–1195.
13. Rakishov B.R., Sivaraksha D.M., Moldabaev S.K., Shulaeva N.A. Strategiya snizheniya riska opasnogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy na otkrytykh razrabotkakh [Strategy for reducing risk of environmental pollution on open cast mining]. *Mining magazine of Kazakhstan*, 2010, no. 6, pp. 36–39.
14. Backman C.M. Global supply and demand of metals in the future. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2008, no. 71, pp. 1244–1253.

15. Hoewel I.V., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the Economic Foundations of Depressive Mining Region. *Medwell Journals. The Social Sciences*, 2015, no. 10 (5), pp. 678–681.
16. Yazikov V.G. Perspektivy razvitiya uranovoy promyshlennosti Respubliki Kazakhstan [Prospects of developing uranium industry in the Republic of Kazakhstan]. *Podzemnoe i kuchnoe vyshchelachivanie urana, zolota, i drugikh metallov: sbornik statey* [Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals: collection of articles]. Moscow, Ruda i matally Publ. house, 2005. Vol. 1: Uranium, pp. 67–76.
17. He Manchao, Xie Heping, Peng Sup. Study on rock mechanics in deep mining engineering. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, no. 16, pp. 2804–2813.
18. Gattinoni P., Pizzarotti E., Scesi L. *Engineering Geology for Underground Works*. Heidelberg, Springer, 2014. 312 p.
19. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Stradanchenko S. G., Z. M. Haleva Principles and economic efficiency of combined technologies of ore extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 6–14. In Rus.
20. Hoewel I.V., Hasheva Z.M. Economical Efficiency of Utilization of Mining Enterprises Allied Waste. *Medwell Journals. The Social Sciences*, 2015, no. 10 (5), pp. 682–686.
21. Prior T., Giurco D., Mudd G., Mason L., Behrisch J. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. *Global Environmental Change*, 2012, no. 22, pp. 577–587.
22. Kaplunov D.R. Theoretical bases of design of development of mineral resources: formation and development. *Mountain magazine*, 2014, no. 7, pp. 49–51. In Rus.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

Vitaliy I. Komashchenko, Dr. Sc., professor, Belgorod State National Research University.

Evgeniy D. Vorobev, Cand. Sc., associate professor, Belgorod State National Research University.

Yury. I. Razorenov, Dr. Sc., professor, Vice-rector, South-Russian state Polytechnic University.