

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-16-23



ОПЫТ ШАХТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ РУД

Голик В.И.^{1,2}, Разоренов Ю.И.¹, Мицик М.Ф.³, Якшина В.В.⁴

¹Южно-Российский государственный политехнический университет, Новочеркасск, Россия

²Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ, Россия

³Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, Шахты, Россия

⁴Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Стратегией повышения эффективности горнодобывающей отрасли России может быть диверсификация производства на технологии выщелачивания металлов как альтернатива традиционным технологиям с потерей некондиционного сырья. Исследование эффективности подземного выщелачивания осуществляется комплексным методом, включающим оценку качества дробления руды и параметров извлечения металлов из руд в производственный раствор с проходкой контрольных выработок для количественного подтверждения. Промышленными многолетними экспериментами доказана возможность извлечения металлов из некондиционного сырья не только с уменьшением потерь, но и с приращением запасов за счет металлосодержащего сырья. Рассмотрены вопросы диверсификации горного производства на технологии выщелачивания металлов на основе систематизации и детализации опыта практики применения технологий с выщелачиванием металлов в подземных шахтных блоках. Сделан вывод, что для расширения диапазона применения технологии выщелачивания традиционная технология подготовки руды к извлечению металлов на месте залегания нуждается в обеспечении нужного гранулометрического состава, равномерной плотности размещения руд в магазине, создании условий для фильтрации потоков выщелачивающих растворов и предупреждения потерь производственных растворов. Полученные закономерности физико-химических процессов выщелачивания в подземных блоках, штабелях на земной поверхности и в активаторах цехов гидрометаллургических производств могут быть применены при добыче металлов из химически вскрываемого металлосодержащего сырья. Конверсия и диверсификация горного производства нуждаются в разработке научных основ выщелачивания, включающих повышение извлечения из руд, обеспечение нужного гранулометрического состава, интенсификацию процесса и др. Для этого могут быть востребованы результаты обобщения ранее выполненных в России и дальнем зарубежье теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: диверсификация, выщелачивание металлов, подземные блоки, металлы, руды, дробление, извлечение металлов, раствор реагентов.

Статья выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-3602.2021.1.5.

© Голик В.И., Разоренов Ю.И., Мицик М.Ф., Якшина В.В., 2021

Для цитирования

Опыт шахтного выщелачивания металлов из руд / Голик В.И., Разоренов Ю.И., Мицик М.Ф., Якшина В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 16–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-16-23>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERIENCE IN MINE LEACHING OF METALS FROM ORES

Golik V.I.^{1,2}, Razorenov Yu.I.¹, Mitsik M.F.³, Yakshina V.V.⁴

¹South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

²North Caucasus State Technological University, Vladikavkaz, Russia

³Institute of the Service Sector and Entrepreneurship (branch) of DSTU, Shakhty, Russia

⁴Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The strategy for increasing efficiency of the mining industry in Russia can be a diversification of production using metal leaching technologies, as an alternative to conventional technologies with the loss of substandard raw materials. Efficiency of in-situ leaching is studied by an integrated method, including an assessment of the quality of ore crushing and the parameters of metal extraction from ores into a production solution with driving reference workings for quantitative confirmation. Long-term industrial experiments have proved the possibility of extracting metals from substandard raw materials not only with a decrease in losses, but also with an increase in reserves due to metal-containing raw materials. The issues of the diversification of mining production based on the technology of metal leaching are considered by systematizing and detailing of the experience in a practical application of technologies with the leaching of metals in underground mine blocks. It is concluded that in order to expand the range of application of the leaching technology, the conventional technology of ore preparation for the extraction of metals in situ needs to ensure the desired particle size distribution, uniform density of ore distribution in the shrinkage stope, create conditions for filtrating leaching solution flows and prevent losses of production solutions. The obtained regularities of physicochemical processes of leaching in underground blocks, stacks above ground and in activators of hydrometallurgical plants can be used in the extraction of metals from chemically opened metal-containing raw materials. Conversion and diversification of mining production requires the development of a scientific basis for leaching, including increasing extraction from ores, ensuring the required particle size distribution, intensifying the process, etc. Thus, generalized theoretical and experimental findings obtained in Russia and abroad may be highly useful.

Keywords: diversification, metal leaching, underground blocks, metals, ores, crushing, metal extraction, reagent solution.

The article was made with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation MD-3602.2021.1.5.

For citation

Golik V.I., Razorenov Yu.I., Mitsik M.F., Yakshina V.V. Experience in Mine Leaching of Metals from Ores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 16–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-16-23>

Введение

С древних времен до вхождения в капиталистический период развития минеральные ресурсы осваивались медленными темпами при минимальной вооруженности процессов добычи и переработки. Период строительства современного общества отличается многократным увеличением объема горного производства ускоренными темпами за счет развития интенсивных технологий с резким увеличением разубоживания руд при добыче и потеря металлов при обогащении. Как попытка улучшить качество руд, появились технологии с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями [5].

Экономические реформы 90-х годов прошлого века в России уменьшили производство стратегических металлов, таких как вольфрам, молибден, олово, свинец, цинк и др., поэтому при относительно хорошей сырьевой базе существует проблема обеспечения металлургического производства сырьем. Ситуация обострилась, потому что конъюнктура сырья способствует

выборочной добыче наиболее ценного сырья, переводя в категорию неактивных другие рудные компоненты [10, 11, 24].

Россия добывает 48 наименований минеральных ресурсов, в то время как большинство стран добывает не более 10. Доля России в мировом производстве достигает 10%, что позволяет занимать третье место после США и Китая.

Главными причинами ослабления сырьевой базы российской горнодобывающей отрасли является снижение темпов разведки месторождений, высокие затраты на содержание инфраструктуры в некомфортных для жизни районах, высокие затраты на транспортирование сырья и экспорт в виде сырья, например, 90% меди и олова, 65% цинка [7, 9, 19]. В последние годы внутреннее потребление минеральных ресурсов снизилось на порядок, добыча меди, титана, вольфрама, молибдена сократилась, например редкоземельных металлов на 90%. Степень освоения ресурсов составляет, %: по меди – 49, цинку – 17, олову – 42, молибдену – 32.

Стратегией выживания экономики может быть диверсификация горных отраслей на технологии выщелачивания металлов, в том числе из некондиционных руд, как альтернатива технологиям с открытым выработанным пространством [8, 18, 21]. Для использования таких технологий в большей мере пригодны руды цветных металлов, обеспечивая уменьшение себестоимости металлов в 5–10 раз.

В горных выработках создаются благоприятные условия для выщелачивания ранее теряемых руд. Процесс выщелачивания осуществляется природой постоянно. Этот феномен можно использовать для добычи металлов в рамках универсальной технологии извлечения металлов подземным, кучным и иными способами.

Об извлечении металлов из руд выщелачиванием известно с XVI века (Испания). Широкое промышленное освоение его связано с добычей меди на руднике «Кананея» в Мексике (1924 г.) и на Урале (30–40 г. прошлого века). В настоящее время подземное выщелачивание применяется для добычи цветных металлов в США, России, Франции, Японии, Австралии, ФРГ и других странах.

В России опытно-промышленные испытания технологии были начаты на Блявинском руднике Медногорского медно-серного комбината в 1971 г. В то же время предпринята попытка промышленно выщелачивать полиметаллы на Фиагдонском руднике (Республика Северная Осетия – Алания).

В последующее время подземное выщелачивание широко применяется для добычи металлов в США, СССР, Франции, Японии, Австралии, ФРГ и других странах. Еще в 1974 г. этим методом было получено 20% мировой добычи меди, а сегодня его доля в мировом производстве некоторых полезных ископаемых достигает 80%. Только в США подземным выщелачиванием ежегодно добывают 300 тыс. т меди и 4 тыс. т урана.

Состояние сырьевой базы металлов для промышленности с 1991 г. ухудшилось, в связи с чем актуальность вовлечения в отработку бедных руд повысилась. Учитывая наличие в отработанных рудных полях забалансовых руд, основным направлением исследований может быть разработка научных основ применения горнотехнических систем выщелачивания проблемных руд. Состояние сырьевой базы металлов для промышленности с 1991 г. ухудшилось. В связи с этим приобретает актуальность вовлечение в отработку бедных и некондиционных руд.

Учитывая наличие в отработанных рудных полях забалансовых и потерянных руд, основным направлением исследований может быть разработка научных основ применения горнотехнических систем выщелачивания из про-

блемных руд металлов, в первую очередь золота цинка и урана. Цель достигается путем детализации имеющихся данных о технологиях с выщелачиванием с учетом индивидуальных особенностей руд: обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований с использованием методов математического планирования эксперимента и средств информационных технологий.

Постановка проблемы

Основными вопросами разработки месторождений являются технологическая возможность, экономическая целесообразность и экологическая безопасность. Для их решения требуется обоснование параметров ориентированной на новые процессы технологии. Вовлечение в отработку месторождений полезных ископаемых, разработка которых традиционными горными способами нерентабельна, позволяет расширить сырьевую базу промышленности. Несомненными преимуществами метода являются его экономичность, относительно большая безопасность, снижение нагрузки на окружающую среду.

Широкому внедрению нового метода препятствует недостаточная изученность процесса, поэтому основной проблемой является разработка научных основ слагающих компонент: горных работ, химико-технологических процессов, гидравлики и гидрогеологии.

Главная задача – извлечение металлов из недр с наименьшими потерями и затратами – решается оптимизацией процессов строительства вскрывающих, подготовительных выработок и определенный порядок их эксплуатации, увязанный во времени и пространстве с управляемым химико-технологическим процессом перевода полезного компонента из руды в раствор. Решающим фактором, от которого зависит полнота и время извлечения полезного компонента из руд и экономическая эффективность технологии является качество дробления руды. Наиболее благоприятными являются куски руды класса +0–50 мм, а наличие фракции +200 мм дискредитирует технологию. Не менее важной задачей является равномерность уплотнения магазинируемой в блоке руды. Компенсационное пространство формируется за счет частичного выпуска отбитой руды, при этом руда разрыхляется только в пределах эллипсоида, а в остальном объеме остается неподвижной.

При выщелачивании скальных руд распространена инфильтрационная схема движения. Раствор реагента от оросителей к приемникам движется под действием гравитации, не заполняя пустоты между кусками руды, а лишь по-

крывая их пленкой, что затрудняет равномерность орошения. Кинетика капиллярного выщелачивания руд определяется взаимной диффузией растворителя и металлоносодержащего раствора, чем обоснована необходимая степень предварительного дробления руд. В процессе извлечения металлов из руды спустя время процесс замедляется и возникает необходимость его интенсификации путем воздействия на выщелоченную массу физическими, химическими и биологическими методами.

Проблему разработки месторождений подземным выщелачиванием формируют следующие вопросы: повышение доли извлечения из руды на месте залегания, повышенные требования к гранулометрическому составу, равномерность уплотнения руды, защита внешней среды от утечек растворов, интенсификация процесса и др.

Методология

Исследование эффективности подземного выщелачивания осуществляется комплексным методом, включающим оценку качества дробления руды и параметров извлечения металлов из руд в производственный раствор при завершении инфильтрации выщелачивающих растворов [2, 3, 22].

Оценка качества взрывного дробления руды осуществляется методом фотопланиметрии на этапах подготовки к выщелачиванию с подсчетом габаритных для выщелачивания фракций.

Полнота извлечения металлов в раствор определяется систематическим определением концентрации металлов в растворе с фиксацией результатов для системного анализа с построением базовых уравнений кинетики выщелачивания. После выщелачивания руды для установления полноты выщелачивания по замагазинированной руде проходятся контрольные выработки с отбором проб и лабораторными определениями неизвлеченного металла. По разнице исходного и конечного содержания металлов в руде определяется полнота извлечения металлов для каждой фракции руды [14, 16, 17].

Обсуждение

Система с выщелачиванием магазинированной руды применялась на урановом руднике «Брюжо». Блок шахтного подземного выщелачивания был подготовлен двумя восстающими, пройденными на расстоянии 30 м один от другого, и откаточным штреком, над которым был оставлен предохранительный целик толщиной 4,5 м. Руду отбивали взрыванием зарядов в шпурах. Рабочий раствор реагента подавался сверху, просачивался по инфильтрационной схеме и принимался сборником растворов (рис. 1).

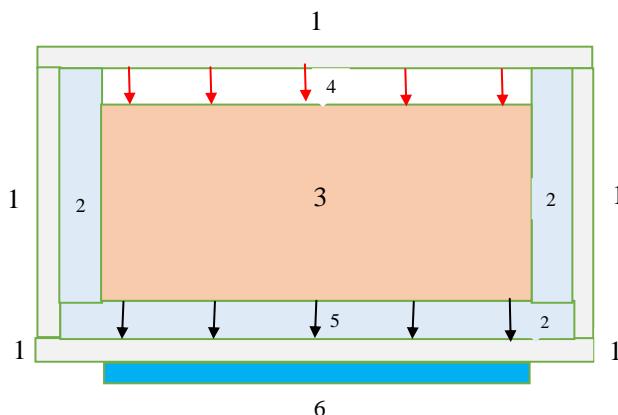


Рис. 1. Выщелачивание руды в магазине:

- 1 – подготовительные выработки; 2 – целики;
- 3 – руда; 4 – рабочий раствор реагента;
- 5 – производственный раствор реагента;
- 6 – сборник растворов

Fig. 1. Leaching of ore in the shrinkage stop:

- 1 is preparatory workings; 2 is pillars;
- 3 is ore;
- 4 is a treatment reagent solution;
- 5 is a product reagent solution;
- 6 is a collecting tank for solutions

Опытно-промышленный блок отработан на месторождении Заозерное (Северный Казахстан) в крепких слоистых породах. Магазин формировали с отбойкой руды скважинами из подэтажных штреков. Рабочий раствор реагента просачивался по инфильтрационной схеме и принимался сборником растворов на нижнем штреке (рис. 2).

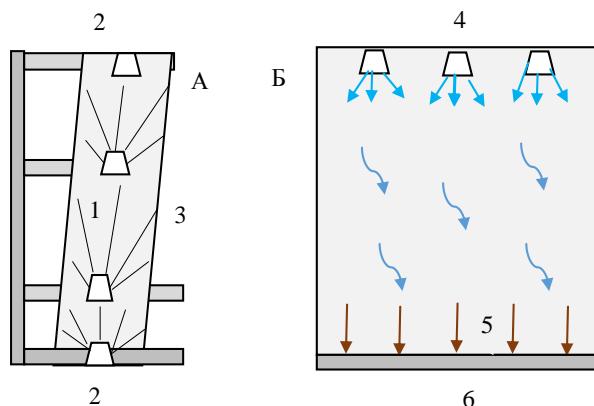


Рис. 2. Механизм выщелачивания руды в опытном блоке: А – подготовка блока и отбойка руды; Б – движение реагентов; 1 – руда;

- 2 – подготовительные выработки;

- 3 – взрывные скважины;

- 4 – подача выщелачивающих растворов;

- 5 – сбор производственных растворов

Fig. 2. An ore leaching procedure in the pilot block:

- A is block preparation and ore breaking;

- B is movement of reagents; 1 is ore;

- 2 is preparatory workings;

- 3 is blast holes;
- 4 is supply of leaching solutions; 5 is collection of product solutions

Технология с этажным принудительным обрушением наиболее перспективна для разработки мощных трещиноватых рудных залежей, не склонных после дробления к слеживанию. Решающее значение приобретает размер рудного куска, зависящий от способа отбойки и дробления. Технология с этажным принудительным обрушением рудного массива на компенсационное пространство применена на урановом месторождении Целинного горно-химического комбината, балансовые запасы которого были отработаны системой слоевого обрушения. Выщелачивали забалансовые руды, расположенные на двух горизонтах с высотой этажа 40 м.

Так же было отработано и другое урановое месторождение Целинного горно-химического комбината в лейкократовых гранит-порфирах с коэффициентом крепости 8–15 по М.М. Протодьяконову. Нижнюю подсечку образовали взрыванием зарядов в нисходящих скважинах из выработок верхнего горизонта и в концах дренажных скважин с горизонта откатки.

Технология с подэтажным обрушением руды на компенсационное пространство применена на урановом месторождении «Восток» (Северный Казахстан, Целинный горно-химический комбинат) при крепости пород 10–12. Отбойку начали по завершении разделки отрезной щели и отбойки нижнего компенсационного подэтажа. Руду выпускали так, чтобы коэффициент ее разрыхления был 1,1–1,15.

Результаты контрольных вскрытий выщелоченных рудных массивов сводятся к следующему:

- удовлетворительное дробление обеспечивается лишь в зонах фигур выпуска;
- запасы междуштрековых целиков дробятся на крупные обломки размерами более 300 мм;
- прилегающие к бортам камер запасы практически не подвергаются дроблению.

В большинстве случаев неудовлетворительное дробление руд дискредитирует систему разработки и сам метод выщелачивания. При всех вариантах для увеличения скорости выщелачивания применяют методы интенсификации процесса [6, 13, 23].

Возможности химических способов интенсификации ограничены. Так, увеличение концентрации растворов кислот и щелочей выше 5–8% практически не увеличивает скорость выщелачивания, а приводит к интенсивному выщелачиванию вмещающих пород. К химическим способам относят и окисление руд кислородом.

Биологические способы интенсификации выщелачивания более эффективны, чем химиче-

ские. Путем адаптации с использованием мутагенных факторов получают культуры, обеспечивающие большую скорость выщелачивания бактерий.

Физические способы интенсификации процессов выщелачивания обеспечивают увеличение скорости за счет активизации процессов окисления, уменьшения крупности руд и т.п., что используют при кучном и подземном выщелачивании. Термическое воздействие увеличивает скорость выщелачивания в 2–3 раза при повышении температуры среды до +35°C при бактериальном выщелачивании и 75–80°C при химическом выщелачивании.

При воздействии электрическим током низкого напряжения скорость выщелачивания, например, меди увеличивается в 2–3 раза. Воздействие тока высокой частоты на сульфидные руды повышает скорость выщелачивания в 5–6 раз.

Основой наиболее часто применяемого механического способа интенсификации является перемещение кусков частично выщелоченной руды взрывной волной, механизмами и машинами. Эффективность интенсификации процессов выщелачивания интерпретируется графиком (рис. 3).



Рис. 3. Интенсификация процесса выщелачивания металлов: 1 – простое выщелачивание; 2 – выщелачивание с интенсификацией взрывом

Fig. 3. Intensification of the metal leaching process:
1 is simple leaching; 2 is explosive intensification leaching

Эффект взрыва в обсаженных скважинах невелик ввиду значительного объема пустот в отбитой руде, причем размеры пустот сравнимы с размерами взрываемых зарядов и воздействие наблюдалось в зоне радиусом в несколько диаметров заряда. Эффективность ударного воздействия можно повысить созданием условий для прохождения волн напряжений, например заливанием пустот жидкостью.

Реализация перспектив шахтного выщелачивания в блоках связана с совершенствованием смежных разделов горного производства, определяющих эффективность выщелачивания металлов из руд [1, 4, 12, 15].

Заключение

В условиях ослабления сырьевой базы горнодобывающей отрасли важным элементом стратегии выживания экономики может быть конверсия на технологии выщелачивания металлов, в том числе из некондиционных руд, как альтернатива традиционным технологиям.

Конверсия и диверсификация горного производства нуждаются в разработке научных основ выщелачивания металлов, включающих повышение доли извлечения из руд на месте залегания, обеспечение нужного гранулометрического состава, интенсификацию процесса и др.

Для достижения поставленной цели могут быть востребованы результаты обобщения ранее выполненных в России и дальнем зарубежье теоретических и экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory // International Journal of GEOMATE, 2016, 10 (1), pp. 1693–1697.
2. 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 // Scientific and technical journal “Explosion Technology”. 2020. №127/84, pp. 102–134.
3. Босиков И.И., Клюев Р.В. Методы системного анализа природно-промышленной системы горнometаллургического комплекса. Владикавказ, 2015. 124 с.
4. Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Ганин М.П. Экологический концепт природного выщелачивания полиметаллических руд // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2019. Выпуск 2. С. 16–26.
5. Управление свойствами твердеющих смесей при закладке выработанного пространства рудных месторождений / Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комашенко В.И., Качурина Н.М. // Записки Горного института. 2020. 243. С. 283–285.
6. Эффективность комбинирования технологий выемки руд в пределах рудного поля / Голик В.И., Лукьянов В.Г., Качурина Н.М., Стась Г.В. // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 10. С. 32–39.
7. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Каргинов К.Г. Основа устойчивого развития РСО – Алания – горнодобывающая отрасль // Устойчивое развитие горных территорий. 2017. Т. 9. № 2 (32). С. 163–171.
8. Голик В.И., Цидаев Б. С., Логачев А.В. Повышение рентабельности добычи нефти путем диверсификации технологий // Устойчивое развитие горных территорий. 2019. Т. 11. №1(39). С. 98–104.
9. Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н. АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – путь длиной в 65 лет // Горный журнал. 2016. № 3. С. 6–12.
10. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России / Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х., Харебов Г.Х. // Вектор ГеоНаук. 2019. Т. 2. № 1. С. 9–18.
11. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр Земли // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 4 (специальный выпуск № 15). С. 5–11.
12. Комашенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологиями подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // Известия ТулГУ. Науки о Земле. Вып. 2. 2016. С. 95–101.
13. Отбойка руд скважинными зарядами модернизированной конструкции / Комашенко В.И., Дзапаров В.Х., Дзеранов Б.В., Стась Г.В. // Вектор ГеоНаук. 2019. Т. 2. № 3. С. 40–46.
14. Выщелачивание полиметаллических руд сернокислотно-хлоридными растворами с добавкой некоторых реагентов / Кондратьев Ю.И., Кондратьева И.Ю., Мирецкий А.В., Малиева З.В. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2006. № 4. С. 34–37.
15. Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход / В.С. Бригда, Х.Х. Кожиев, А.А. Сарян, А.К. Джюрова // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 4. С. 20–32. DOI: 10.25018/0236-14932020-4-0-20-32.
16. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания / Хулиедзе К.К., Кондратьев Ю.И., Бетрозов З.С., Залишвили В.Б. // Устойчивое развитие горных территорий. 2016. №1. С. 46–49.
17. Briggs D. Recovery of copper by solution mining methods. Tucson: Arizona Geological Survey, 2015. 109 p.
18. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2016. Vol. 37. No. 2. Pp. 73–119.
19. Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology // Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, pp. 77–83.
20. MacCarthy J., Nosrati A., Skinner W., Addai-Mensah J. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore // Hydrometallurgy. 2016. Vol. 160. Pp. 26–37.
21. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations // SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference–Mining: Navigating the Global Waters. Denver, United States. 2015. Pp. 529–532.

22. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach // Proceedings of the 3rd International Conference on Heap Leach Solution, 2015. Lima, pp. 123–130.
23. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. 2015. T. 157. Pp. 306–324.
24. Новый подход для оценки эффективности работы горно-обогатительных комбинатов / Мельников И.Т., Гавришев С.Е., Михайлов А.Г., Пыталев И.А., Шевцов Н.С., Васильев К.П. // Горная промышленность. 2012. № 5(105). С. 60–66.

References

1. Burdzieva O.G., Zaalistvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. International Journal of GEOMATE, 2016, 10 (1), pp. 1693–1697.
2. 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. Scientific and technical journal “Explosion Technology”, 2020, no. 127/84, pp. 102–134.
3. Bosikov I.I., Klyuev R.V. System analysis methods for the natural and industrial system of the mining and metallurgical complex. Vladikavkaz, 2015, 124 p. (In Russ.)
4. Golik V.I., Burdzieva O.G., Ganin M.P. An ecological concept of natural leaching of metal ores. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle* [Proceedings of Tula State University. Geosciences], 2019, no. 2, pp. 16–26. (In Russ.)
5. Golik V.I., Dmitrak Yu. V., Komashchenko V.I., Kachurin N.M. Management of the properties of hardening mixtures, when filling the mined-out space of ore deposits. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute], 2020, vol. 243, pp. 283–285. (In Russ.)
6. Golik V.I., Lukyanov V.G., Kachurin N.M., Stas G.V. Efficiency of combining ore mining technologies within the ore field. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering], 2020, vol. 331, no. 10, pp. 32–39. (In Russ.)
7. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Karginov K.G. The basis for sustainable development of North Ossetia-Alania is the mining industry. *Ustoychivoe razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2017, vol. 9, no. 2 (32), pp. 163–171. (In Russ.)
8. Golik V.I., Tsidaev B.S., Logachev A.V. Increasing the profitability of oil production by diversifying technologies. *Ustoychivoe razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2019, vol. 11, no. 1 (39), pp. 98–104. (In Russ.)
9. Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. JSC Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology: a path for 65 years. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2016, no. 3, pp. 6–12. (In Russ.)
10. Dmitrak Yu.V., Tsidaev B.S., Dzaporov V.Kh., Kharebov G.Kh. Mineral resources base of non-ferrous metal-
- lurgy in Russia. *Vektor GeoNauk* [Vector of GeoSciences], 2019, vol. 2, no. 1, pp. 9–18. (In Russ.)
11. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Scientific and methodological foundations of designing an ecologically balanced cycle of integrated development and conservation of the Earth's interior. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2015, no. 4 (special issue no. 15), pp. 5–11. (In Russ.)
12. Komashchenko V.I., Vasilev P.V., Maslennikov S.A. A reliable raw material base is for underground mining of the KMA deposits. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Geosciences], 2016, no. 2, pp. 95–101. (In Russ.)
13. Komashchenko V.I., Dzaporov V.Kh., Dzeranov B.V., Stas G.V. Breaking of ores with modernized borehole charges. *Vektor GeoNauk* [Vector of GeoSciences], 2019, vol. 2, no. 3, pp. 40–46. (In Russ.)
14. Kondratiev Yu.I., Kondratieva I.Yu., Miretsky A.V., Malieva Z.V. Leaching of polymetallic ores with sulfuric acid-chloride solutions with the addition of some reagents. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsventnaya metallurgiya* [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy], 2006, no. 4, pp. 34–37. (In Russ.)
15. Brigida V.S., Kozhiev Kh.Kh., Saryan A.A., Dzhioeva A.K. Spatiotemporal objectives of geoecology: an interdisciplinary approach. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2020, no. 4, pp. 20–32. DOI: 10.25018/0236-14932020-4-0-20-32.
16. Khulelidze K.K., Kondratiev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalistvili V.B. Assessment of primary and technogenic deposits in North Ossetia-Alania as possible objects of the application of the underground and heap leaching technology. *Ustoychivoe razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2016, no. 1, pp. 46–49. (In Russ.)
17. Briggs D. Recovery of copper by solution mining methods. Tucson: Arizona Geological Survey, 2015. 109 p.
18. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology - current state, innovations, and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016, vol. 37, no. 2, pp. 73–119.
19. Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of mineral processing engineering education in China University of Mining and Technology. *Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, pp. 77–83.
20. MacCarthy J., Nosrati A., Skinner W., Addai-Mensah J. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*. 2016, vol. 160, pp. 26–37.
21. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations. SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference – Mining: Navigating the Global Waters. Denver, United States, 2015, pp. 529–532.
22. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide / supergene and sulfide heap

- leach. Proceedings of the 3rd International Conference on Heap Leach Solution, 2015. Lima, pp. 123–130.
23. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015, vol. 157, pp. 306–324.
24. Melnikov I.T., Gavrishev S.E., Mikhailov A.G., Pytalev I.A., Shevtsov N.S., Vasiliev K.P. A new approach for evaluating the efficiency of mining and processing plants. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2012, no. 5 (105), pp. 60–66. (In Russ.)

Поступила 08.04.2021; принята к публикации 26.04.2021; опубликована 27.09.2021
Submitted 08/04/2021; revised 26/04/2021; published 27/09/2021

Голик Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ, Россия, профессор кафедры «Горное дело», Южно-Российский государственный политехнический университет, Новочеркасск, Россия. Email: v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, ректор, Южно-Российский государственный политехнический университет, Новочеркасск, Россия. Email: yiri1963@mail.ru

Мицик Михаил Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и прикладная информатика», Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, Шахты, Россия. Email: m_mits@mail.ru

Якшина Виктория Владимировна – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: v.v.yakshina@inbox.ru

Vladimir I. Golik – DrSc (Eng.), Professor, North Caucasus State Technological University, Vladikavkaz, Russia, Professor of the Department of Mining, South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia.
Email: v.i.golik@mail.ru

Yuri I. Razorenov – DrSc (Eng.), Professor, Rector of South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia.
Email: yiri1963@mail.ru

Mikhail F. Mitsik – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mathematics and Applied Informatics, Institute of Service Sector and Entrepreneurship (branch) of DSTU, Shakhty, Russia.
Email: m_mits@mail.ru

Viktoria V. Yakshina – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: v.v.yakshina@inbox.ru