

УДК 504.55.054:622(470.6)

УСЛОВИЯ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЗАБАЛАНСОВОГО СЫРЬЯ

Голик Владимир Иванович¹,
v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович²,
yiri1963@mail.ru

Ляшенко Василий Иванович³,
vi_lyashenko@mail.ru

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

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

³ Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт промышленной технологии»,
Украина, 52204, г. Желтые Воды, Днепропетровская обл., Бульвар свободы, 37.

Актуальность. Традиционные технологии подземной разработки рудных месторождений характеризуются безвозвратными потерями забалансовых запасов в недрах. Альтернативу традиционным технологиям разработки составляет технология с выщелачиванием металлов в подземных условиях без извлечения на земную поверхность, позволяющая вовлечь в производство забалансовые запасы.

Цель: доказательство технической возможности и экономической целесообразности выщелачивания металлов из некондиционных металлосодержащих минералов с решением связанных с этим задач.

Метод исследования проблемы основывается на анализе результатов промышленно-экспериментального выщелачивания забалансовых и балансовых руд на скальных месторождениях с анализом извлечения металлов в продукционный раствор в результате технологического воздействия раствором реагентов на металлические руды.

Результаты. Предложен алгоритм комбинирования альтернативных технологий подземной разработки с созданием компенсационного пространства для дробления забалансовой руды путем выемки балансовой руды. Обоснован принцип комбинирования технологий отработки месторождения традиционным способом и подземным с селективной выемкой части балансовых руд и образованием необходимого для разрыхления компенсационного пространства, на которое отбивается забалансовая руда с последующим выщелачиванием. Детализированы представления об основных процессах новой технологии: отбойке, выпуске, орошении и интенсификации выщелачивания. Показаны преимущества вовлечения в производство забалансовых руд по новой технологии, в том числе полнота использования недр, упрочнение ресурсной базы, снижение нагрузки на окружающую среду.

Выводы. Комбинирование технологий, позволяющее извлекать часть балансовых руд для заводской переработки и усреднять содержание забалансовых руд до приемлемого с точки зрения выщелачивания значения, отвечает интересам ресурсо- и природосбережения и является перспективным направлением упрочнения сырьевой базы горно-металлургической отрасли, оздоровления экономики и решения экологических и социальных проблем.

Ключевые слова:

Руда, месторождение, забалансовые запасы, выщелачивание, металл, подземная разработка.

Актуальность и цель исследования

Цветная металлургия осуществляет добычу, обогащение, металлургическую переработку руд и концентратов полезных ископаемых, производство химических продуктов, минеральных удобрений, цемента, переработку металлов в изделия и полуфабрикаты, переработку отходов цветных, редких и благородных металлов, производство углеродной продукции, изготовление оборудования для отрасли и содержание инфраструктуры.

Отрасль отличается характерными особенностями:

- материалоемкость, переработка бедного по содержанию полезных компонентов сырья сложного вещественного состава;
- топливо- и электроемкость;
- повышенная трудоемкость;

- комплексность переработки сырья;
- многостадийность технологических процессов;
- зависимость от природного сырьевого фактора;
- повышенная экологическая опасность производства;
- высокая капиталоемкость и фондоемкость.

Развитие мировой экономики сопровождается ростом потребления минеральных ресурсов. Потребление цветных и легирующих металлов за последние 100 лет увеличилось в 3–5 раз и может увеличиться более чем в 5 раз в ближайшие 50 лет.

В переработку вовлекаются руды с низким содержанием металлов и тонкой вкрапленностью. За последние 20 лет содержание цветных металлов в рудах уменьшилось в 1,3–1,5 раза. При этом доля труднообогатимых руд возросла до 40 % от массы добываемого сырья. Если раньше часть руд с высоким содержанием металлов нередко направлялась

непосредственно в металлургическую плавку, то в настоящее время все руды требуют предварительного обогащения. Эффективность предприятий цветной металлургии в большей степени, чем других отраслей, зависит от природного сырьевого фактора.

Расходы на геологоразведочные работы на твердые полезные ископаемые сокращаются, а компенсация погашенных при добыче запасов приростом в результате геологоразведочных работ обеспечивается далеко не для всех видов минерального сырья. Плановые показатели подпрограммы «Воспроизводство минерально-сырьевой базы, геологическое изучение недр» выполнены только по 10 из 23 видов минерального сырья.

Это положение пытаются изменить с помощью мер государственной поддержки добывающих предприятий депрессивных, удаленных, слабо освоенных и геополитически значимых районов России. Фактором низкой активности бизнеса является слабая изученность недр и высокие геологические риски компаний при проведении геологоразведочных работ. Перспективы упрочнения минерально-сырьевой базы связаны с разработкой новых технологий поисков слабо проявленных рудных объектов путем выполнения геологических, тематических и научных исследований в сфере ответственности государства. Это позволит поддерживать оптимальный баланс между разрабатываемыми и неразрабатываемыми запасами и прогнозными ресурсами полезных ископаемых, являющийся главным показателем минерально-сырьевой безопасности страны.

Разработка рудных месторождений подземным способом осуществляется методами, обладающими при всем многообразии вариантов общими признаками:

- образование пустот в земной коре для добычи сырья;
- сохранение геомеханической стабильности окрестных участков земной коры путем заполнения обрушенными вмещающими породами, оставления поддерживающих целиков или возведения искусственных массивов;
- выдача на земную поверхность для переработки всей отделенной от массива отвечающей современным кондициям горной массы;
- оставление в недрах не отвечающей современным кондициям горной массы.

Преимущество традиционной технологии – возможность достижения экономического эффекта в короткое время за счет опережающей отработки наиболее богатых участков месторождений. Это преимущество превращается в крупный недостаток, поскольку большая часть запасов переводится в разряд неактивных и остается в недрах в виде потерь [1].

Формирование стабильного по качеству рудного потока во времени и пространстве обеспечивается селективизацией выемки руд при добыче и комплексном использовании добытых руд.

Альтернативу традиционным технологиям разработки составляет технология с выщелачиванием металлов в подземных условиях без извлечения на земную поверхность [2].

Разработка подземным выщелачиванием принципиально отличается от традиционной технологии:

- заполнение образованных при отбойке руд пустот раздробленной горной массой, участвующей в сохранении геомеханической стабильности окрестных участков земной коры;
- выдача на земную поверхность для переработки только части горной массы из соображений обеспечения компенсационного пространства для отбойки руд;
- переработка разноразмерных, в том числе забалансовых, руд в недрах.

Несомненными преимуществами метода являются его экономичность, большая по сравнению с традиционной технологией безопасность работ, меньшая нагрузка на природную среду и возможность отрабатывать считавшиеся безвозвратно потерянными в охранных целиках, зонах обрушения, горелых рудах и т. п. запасы [3].

Исследования теоретических аспектов выщелачивания некондиционного металлосодержащего сырья в России начались более 50 лет назад. В теорию и практику выщелачивания внесли вклад: Н.П. Лаверов, Б.Н. Ласкорин, К.Н. Трубецкой, В.А. Чантурия, В.Ж. Арнс, В.К. Бубнов, М.Н. Тедеев, Е.И. Шемякин и др.

Наибольшие успехи достигнуты при выщелачивании меди, урана, золота и цинка, чему посвятили свои труды А.И. Калабин, В.П. Новик-Качан, И.К. Луценко, Л.И. Лунев, И.Е. Рудаков, Р.П. Петров, Н.Н. Хабиров, В.К. Бубнов, М.Н. Тедеев и др.

Несмотря на положительный опыт промышленного выщелачивания, пока только урана, меди, золота, недостаточная изученность процесса препятствует широкому внедрению метода на скальных месторождениях руд остальных металлов.

Подземное выщелачивание в блоках без учета всех природно-техногенных факторов может дискредитировать идею, поэтому основной задачей развития метода является разработка научных основ новой технологии.

Целью экспериментальных исследований является доказательство технической возможности и экономической целесообразности выщелачивания металлов из некондиционных, в том числе забалансовых, руд на месте их природного залегания.

Задача включает в себя решение ряда связанных с подземными работами вопросов, в том числе: бурение скважин, проходка подготовительных и нарезных выработок, взрывные работы, приготовление и переработка растворов, транспорт растворов, орошение блоков, борьба с утечками и т. п.

Методы исследования

Критерием эффективности технологии с выщелачиванием металлов является количество металлов, переведенное в продукционный раствор в результате технологического воздействия на металлические руды [4]. Количественная характеристика извлечения позволяет судить об эффективности технологии.

Материалом исследования является минеральное сырье с некондиционным содержанием металлов: бедные руды и хвосты суспензионного обогащения полиметаллических руд.

Для достижения поставленной цели выполняются серии экспериментов по выщелачиванию хвостов обогащения или руды, например:

- 1) агитационное выщелачивание;
- 2) агитационное выщелачивание после активации в сухом состоянии в дезинтеграторе;
- 3) выщелачивание в дезинтеграторе;
- 4) агитационное выщелачивание после активации и выщелачивания в дезинтеграторе;
- 5) многократное выщелачивание и активация в дезинтеграторе.

Эксперименты первой серии проводят следующим образом:

В единичном эксперименте выщелачивают 50 г минералов, измельченных до крупности 2 мм. Количество выщелачивающего раствора определяют из условия обеспечения соотношения «жидкого компонента к твердому».

Раствор смешивают с пробой хвостов или руды, полученную пульпу подвергают агитационному выщелачиванию в течение заданного времени на агитаторе с постоянной и заданной для данного эксперимента скоростью вращения. После выщелачивания пульпу фильтруют, а отфильтрованный раствор анализируют на содержание свинца и цинка.

В остальных сериях эксперименты имеют отличия:

- во второй серии в дезинтеграторе активируют несколько больше 50 г хвостов или руды для компенсации уноса мелких фракций;
- во второй серии минералы выщелачивают спустя минимальное время после дезинтегратора;
- в третьей серии минералы в количестве 50 г добавляют в выщелачивающий раствор и обрабатывают в дезинтеграторе;
- в четвертой серии пульпу также пропускают через дезинтегратор, после чего выщелачивают в агитаторе с постоянной и одинаковой скоростью вращения;
- в пятой серии пульпу пропускают через дезинтегратор неоднократно.

Независимые факторы, влияние которых на извлечение металлов в продукционный раствор исследуется, варьируются на минимальном, нулевом и максимальном уровнях, например:

- содержание серной кислоты и хлорида натрия, $X_1 - 2, 6$ и 10 г/л, $X_2 - 20, 90$ и 160 г/л;
- соотношение Ж:Т $X_3 - 4, 7$ и 10 ;

- время агитационного выщелачивания, $X_4 - 0,25, 0,625$ и 1 час, кроме третьей и пятой серии;
- частота вращения роторов дезинтегратора, $X_5 - 50, 125$ и 200 Гц, кроме первой серии;
- количество циклов обработки, $X_6 - 3, 5, 7$ для пятой серии.

Эксперименты повторяются трижды, а их результаты являются основой для формирования матрицы планирования экспериментов и суждения об эффективности извлечения металлов из некондиционного сырья.

Так, руды цветных металлов Садонских месторождений (Россия, Северный Кавказ) с химическим составом, %: $\text{SiO}_2 - 31,4$; $\text{Fe} - 4,4$; $\text{CaO} - 1,96$; $\text{S} - 1,88$; $\text{Ag} - 0,015$; $\text{Cu} - 0,18$; $\text{Mn} - 0,015$; $\text{K}_2\text{O} - 3,5$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,8$; $\text{TiO}_2 - 0,03$; $\text{Zn} - 0,95$; $\text{Pb} - 0,84$, обогащали в тяжелых суспензиях с извлечением свинца и цинка – $80-85$ %, серебра – 60 %, кадмия – 56 %, висмута – 30 % и выходом хвостов $25-50$ %.

По сравнению с агитационным выщелачиванием активация в дезинтеграторе и выщелачивание вне его увеличила извлечение: по свинцу – в $1,4$ раза, по цинку – в $1,1$ раза.

Выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом активации в дезинтеграторе и выщелачивания вне его обеспечивает примерно такое же извлечение, но сокращает продолжительность процесса с $15-60$ минут до первых секунд, т. е. на 2 порядка. По степени влияния на процесс следуют в порядке убывания: содержание в выщелачивающем растворе реагента, частота вращения роторов дезинтегратора, соотношение Ж:Т.

В качестве результатов промышленных экспериментов используются данные о выщелачивании забалансовых и балансовых руд на скальных месторождениях.

Извлечение металлов из раствора может быть осуществлено вариантом мембранной технологии с отделением взвесей подщелоченного раствора путем создания гидросреды при $\text{pH } 9-10$ с осаждением солей жесткости и металлов.

При исходном содержании железа в исследуемой пробе железистых кварцитов месторождения «Лебединское» (КМА) 8 % выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом активации в дезинтеграторе и выщелачивания вне его обеспечило примерно одинаковое извлечение железа, но сделало это на 2 порядка быстрее.

Выщелачивание в дезинтеграторе увеличило извлечение металлов в раствор по сравнению с агитационным выщелачиванием на $10-25$ % и может быть увеличено до требований санитарных норм при повторении циклов переработки. При исходном содержании в исходных хвостах $\text{As}, \text{Ba}, \text{Be}, \text{Bi}, \text{Co}, \text{Cr}, \text{Li}, \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Pb}, \text{Sb}, \text{Sn}, \text{Sr}, \text{Ti}, \text{V}, \text{Y}$ на уровне $(30-50) \cdot 10^{-6}$ % извлекается, %: меди $(3,8-4,3) \cdot 10^{-3}$, никеля – $(2,9-3,5) \cdot 10^{-3}$, цинка – $(3,2-4,2) \cdot 10^{-4}$ и в тех же границах другие металлы.

Результаты

Выщелачивание металлов из некондиционных руд на отдельных участках осуществлялось с 50-х гг. прошлого века на урановых месторождениях Средней Азии: Киик-Тал, Чаркасар I, Табошар и др. [5].

Забалансовые руды всего Быкогорского месторождения на Северном Кавказе выщелачивались без разрушения массива фильтрационным потоком реагента в зоне напорных трещинных вод. Извлечение составило 59 %. На месторождении «Звездное» в Казахстане извлечение металла из бедно-балансовых руд составило 70 %.

Балансовые руды впервые в мировой практике выщелачивали в 80-х гг. прошлого века на месторождении «Восток» в Казахстане с извлечением 72 % запасов металла. Полнота извлечения подтверждена проходкой контрольных выработок по хвостам выщелачивания.

На рудниках ОАО «ППГХО» с восьмидесятых годов прошлого века выщелачиванием добывают более 30 % металла с извлечением около 65 %.

Объемы исследований и средства контроля полноты процесса позволяют считать применяемые методы исследований корректными.

Принципиальное различие между традиционной и новой технологиями состоит в том, что традиционной технологией извлекаются только балансовые руды а выщелачиванию доступны и забалансовые запасы.

Металлическое месторождение включает балансовые и забалансовые запасы, соотносящиеся, примерно, как 40 и 60 %. При отработке только традиционными технологиями забалансовые запасы относятся в потери, а из балансовых запасов отрабатываются руды титульных для данного предприятия с его обогащательной базой металлов.

Отработка выщелачиванием только забалансовых запасов не может обеспечить предприятию финансовое благополучие. Рациональный компромисс достигается при комбинировании альтернативных технологий [6].

Целесообразно рудное тело в пределах блока делить на секции, в которых балансовая руда одним из вариантов традиционной системы извлекается в объеме около 40 % от запасов блока для создания компенсационного пространства при отделении от массива оставшейся руды (рис. 1).

Секции отрабатываются в нисходящем направлении (рис. 2) с отбойкой разноразмерных запасов на открытую камеру, в ходе чего содержание металлов в руде усредняется и повышается, что улучшает процесс выщелачивания. Взрывание зарядов в скважинах нижележащей секции интенсифицирует процесс выщелачивания в вышележащей секции за счет подвижки рудных кусков.

Основу комбинирования технологий отработки месторождения традиционным способом и подземным составляет селективная выемка части балансовых руд с образованием необходимого для разрыхления компенсационного пространства, на ко-

торое отбивается забалансовая руда другого сорта с последующим выщелачиванием.

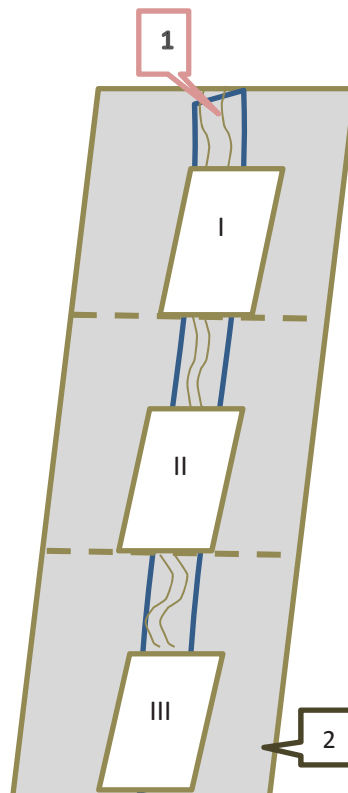


Рис. 1. Комбинированная разработка разноразмерных руд: 1 – балансовые руды; 2 – забалансовые руды; I–III – участки выемки балансовых руд с созданием компенсационного пространства для дробления забалансовых руд

Fig. 1. Combined exploration of all sorts of ores: 1 are the commercial ores; 2 are the non-commercial ores; I–III are the areas of extraction of commercial ores forming the compensation space for crushing non-commercial ores

Комбинированная технология отвечает концепции ресурсосбережения в большей степени, чем каждая из составляющих технологий в отдельности [7]. Вовлечение в отработку месторождений забалансовых или недоступных для традиционных технологий руд расширяет сырьевую базу горнодобывающей промышленности. Несомненными преимуществами комбинирования являются: экономичность, повышенная по сравнению с традиционным способом безопасность работ и сохранность внешней среды.

Полнота и время извлечения полезного компонента из руды и экономическая эффективность технологии определяется качеством дробления руды. Для выщелачивания наиболее пригодны рудные куски размером от 20 до 50 мм, эффективность выщелачивания снижают фракции размером 200 мм, а куски больших размеров полностью дискредитируют технологию, тем более что не подлежат корректировке.

Компенсационное пространство для отбойки руды образуется путем частичного выпуска ранее

отбитой руды в пределах объема эллипсоида выпуска.

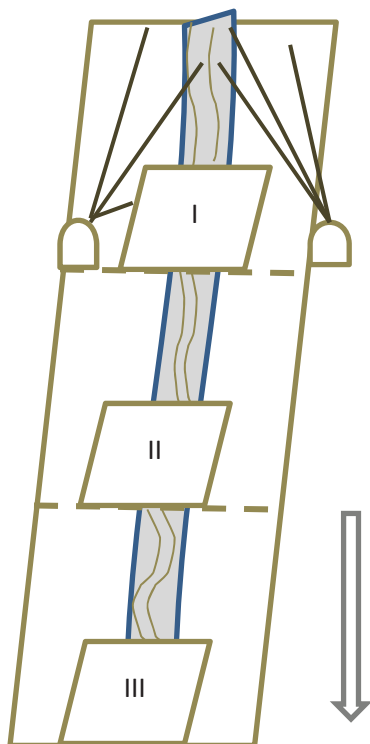


Рис. 2. Отбойка разнорудных руд для выщелачивания

Fig. 2. Breaking all sorts of ores for leaching

При инфильтрационном выщелачивании раствор реагента опускается по раздробленной руде под действием сил гравитации, не заполняя пустоты между кусками руды, а лишь покрывая их пленкой. Переуплотнение руды создает преграду движению раствора, а большие промежутки между кусками руды не обеспечивают проникновение раствора в кусок.

При уменьшении содержания металлов в продуктивном растворе ниже допустимого значения возникает необходимость интенсификации процессов выщелачивания путем воздействия на руду.

Основным направлением совершенствования технологий подземного выщелачивания в части повышения полноты использования потерь является сплошная бесцеликовая отработка месторождений. Она способствует перманентной интенсификации процесса выщелачивания за счет разрушения руд в пределах новых секций.

Отбойка руды в вертикальных слоях производится на горизонтальную подсечку поярусно снизу вверх секционным взрыванием скважин с опережением подсечки на толщину отбиваемого вертикального слоя.

Отбитая в подсечке руда выпускается в торцы выработок нижнего горизонта. Объем подсечки устанавливается с расчетом нужного разрыхления обрушаемой руды и исключения возможности образования между выпускными выработками не выпущенной руды.

При одинаковой крупности руды скорость процесса извлечения уменьшается с увеличением крупности руд вследствие уменьшения градиента концентраций между поровым раствором и объемом растворителя. Для учета этого фактора рудный массив дробят на куски крупностью, уменьшающейся пропорционально снижению градиента концентраций извлекаемого полезного ископаемого между поровым раствором и объемом растворителя.

Для этого расстояние между концами скважин в верхней части массива увеличивается, а в нижней части массива уменьшается. Расход ВВ в нижней части максимальный, а в верхней части – минимальный.

Дифференцированное дробление массива обеспечивается отбойкой горизонтальными слоями с переменной линией наименьшего сопротивления или приближением формы отбиваемого слоя к конфигурации вертикальной проекции фигуры выпуска руды (рис. 3).

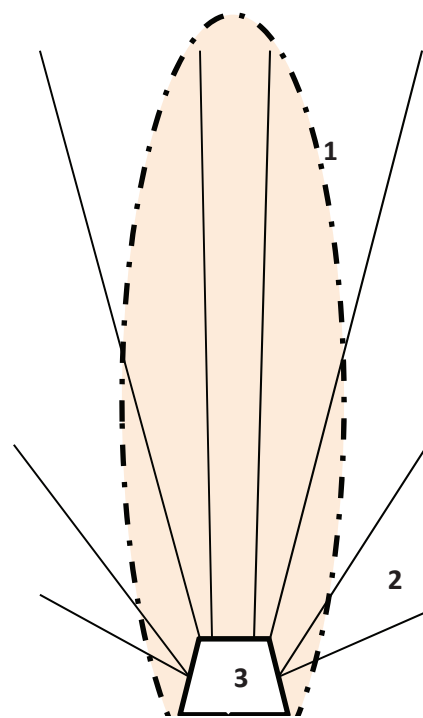


Рис. 3. Формирование эллипсоида разрыхления руд: 1 – граница эллипсоида; 2 – взрывные скважины; 3 – выпускная выработка

Fig. 3. Formation of ore fragmentation ellipsoid: 1 is the boundary of the ellipsoid; 2 are the blast holes; 3 is the final development

Орошение руды может осуществляться по обуренным в магазинированной руде скважинам с обсадкой перфорированными трубами. Эффективность выщелачивания обеспечивается регулированием потоков реагента внутри выщелачиваемого массива. Утечка технологических растворов предотвращается созданием противодиффузионных экранов из веществ, способных к активной полимеризации под воздействием ударных волн.

В процессе выщелачивания руд равномерность распределения потока реагента нарушается, и часть выщелачиваемых руд не вступает в контакт с растворителем.

Интенсификация процесса выщелачивания обеспечивается вовлечением в процесс недостаточно разрыхленных участков блока бурением по магзинированной руде скважин, в которые вводятся интенсификаторы. Наиболее часто интенсификация основывается на взрывании зарядов ВВ в выработках и скважинах.

Интенсификация основана на феномене распространения подвижек кусков руды с открытием новых активных поверхностей для выщелачивания.

Интенсификация процесса может быть осуществлена путем невзрывного воздействия на руду, например, воздухом под давлением, ультразвуковыми электромагнитными колебаниями, токами рудных гальванических микроэлементов и т. п.

Сплошная бесцеликовая отработка всех запасов месторождения способом подземного выщелачивания должна сочетаться со снижением объемов подготовительно-нарезных работ, что достигается совмещением функций выработок оросительного и дренажного горизонтов.

Так, на месторождении «Быкогорское» доработка забалансовых запасов производилась с этажной обойкой руды и выщелачиванием в инфилтративном режиме. После освоения на руднике электровакуумных установок для дренажа продукционных растворов функции дренажного горизонта стал выполнять откаточный. Корректировка схем орошения и дренажа улучшила экономические показатели. Трудоемкость системы снизилась в два с лишним раза, удельный вес нарезных работ – в 3,1 раза, эффективность горно-подготовительных работ повысилась в 2,5 раза [8].

Процессы и условия вовлечения в производство забалансовых запасов сведены в таблицу.

Особенность технологии с выщелачиванием состоит в том, что в продукционный раствор извлекаются все содержащиеся в руде металлы в зависимости от технологических факторов. Стоимость некоторых теряемых безвозвратно компонентов может превышать стоимость полученных титульных металлов [9].

Радикальное сокращение объемов хранимых на земной поверхности хвостов обогащения и металлургического передела больше, чем остальные меры, уменьшает воздействие горного производства на окружающую среду [10]. Так, вовлечение в переработку методами выщелачивания забалансовых урановых руд, образовавшихся при освоении месторождений Стрельцовского рудного поля, позволяет существенно увеличить производственную мощность предприятия без больших капитальных затрат методами выщелачивания [11].

Прибыль от вовлечения забалансовых запасов в производство образуется за счет увеличения объемов добычи, прироста продукции и повышения отдачи капитала [12]:

$$\Pi = \sum_1^n \left[(C_p^6 - Z_d^6 - Z_o^6 - Z_m^6) A_6^c + (C_p^k - Z_d^k - Z_o^k - Z_m^k) - \Pi_o \right] A_k,$$

где Π – годовая прибыль от комбинирования технологий, р; C_p^6 – Стоимость реализации металлов из балансовых руд, р/т; Z_d^6 – затраты на добычу балансовых руд, р/т; Z_o^6 – затраты на обогащение балансовых руд, р/т; Z_m^6 – затраты на металлургический передел балансовых руд, р/т; C_p^k – стоимость реализации металлов из комбинированных запасов, р/т; Z_d^k – затраты на добычу балансовых руд, р/т; Z_o^k – затраты на обогащение комбинированных запасов, р/т; Z_m^k – затраты на металлургический передел комбинированных запасов, р/т; A_6^c – объем селективно добытых балансовых руд, т; A_k – объем добычи комбинированных запасов, т; n – номенклатура извлекаемых металлов; Π_o – штраф за хранение загрязняющих окружающую среду отходов при селективной добыче балансовых руд.

Результаты исследования проблемы позволяют утверждать, что:

- процесс перевода металлов в раствор адекватен и управляем;
- использование способов подготовки блоков к отработке традиционными технологиями для подземного блокового выщелачивания не целесообразно;
- добыча металлов выщелачиванием забалансовых руд может быть эффективной при соблюдении определенного для каждого месторождения соотношения объемов добычи балансовых и забалансовых руд и параметров производственных процессов.

Экспериментально определено, что технология обеспечивает извлечение металлов в интервале от 50 до 80 % от исходного содержания в хвостах со снижением остаточного содержания до норм предельно допустимых концентраций (ПДК). Такой результат получен при переработке исследованных хвостов обогащения различных типов: полиметаллов Садона, угля Российского Донбасса и железистых кварцитов Курской магнитной аномалии. Сходимость результатов подтверждает корректность исследований.

Важной особенностью продуктов механохимической технологии является то, что после извлечения металлов хвосты обогащения могут быть использованы в составе твердеющей смеси не только в качестве инертных заполнителей, но и вяжущих компонентов, так как увеличение активности компонентов на 20–25 % повышает прочность смеси до 1 МПа. При утилизации хвостов обогащения в составе закладочных смесей экономический эффект создается за счет экономии цемента при использовании фракций крупностью до 0,076 мм, доля которых в хвостах обогащения после активации в дезинтеграторе достигает 85 %.

В процессе механоактивации извлекаются все содержащиеся в хвостах металлы до уровня санитарных требований, после чего вторичные хвосты

Таблица. Условия вовлечения забалансовых запасов в производство
Table. Conditions of involving non-commercial reserves into production

Процессы Processes	Цели и способы осуществления Goals and means of implementation	Способ реализации Method of implementation
Подготовка блоков Block preparing	Совмещение функций выработок оросительного и дренажного горизонтов Combination of functions of irrigation and drainage horizons workings Перманентная интенсификация процесса выщелачивания прирезкой новых участков Permanent intensification of leaching by new sites cutback	Сплошная бесцеликовая отработка Solid pilarless mining
Отбойка и дробление руды Ore breaking and crushing	Выемка части балансовых руд для формирования компенсационного пространства Excavation of a portion of commercial ores to form a compensation space	Система с открытым выработанным пространством System with open mined-out space
	Отбойка остальных запасов секции для выщелачивания с условиями: усреднение качества, уменьшение крупности руды пропорционально градиенту концентрации, отбойка слоями с переменной линией наименьшего сопротивления, соблюдение формы эллипсоида выпуска Breaking the rest of section reserves for leaching with the conditions: average quality, reducing the particle size of ore proportional to gradient concentration, slabbing with a variable line of the least resistance, compliance of ellipsoidal drawing	Система с открытым выработанным пространством, обеспечение крупности +20–50 мм и равной плотности руды System with open mined-out space, providing 20–50 mm size and equal ore density
Орошение руды Ore irrigation	С поверхности руды From ore surface По скважинам в разрушенной руде In well in the broken ore С использованием гидравлического разрыва With hydraulic fracturing	Стабилизация скорости фильтрации рабочих растворов Stabilization filtration rate of working solutions
Сбор растворов и изоляция участков Collection of solutions and sealing	Гидроизоляция раствороприемников Waterproofing of plaster-receivers Противофильтрационные завесы Grout curtain Электровакуумный дренаж растворов Vacuum drainage of solutions	Исключение миграции растворов в окружающую среду Exception of solution migration into environment
Интенсификация процесса Process intensification	Взрывание зарядов ВВ в скважинах Blasting explosive charges in boreholes Нагнетание сжатого воздуха Compressed air injection Ультразвуковые колебания Ultrasonic vibrations Электромагнитная обработка Electromagnetic processing Промывка растворами Rinsing with solutions Введение химических составов Introduction of chemical compounds Использование штаммов бактерий Use of bacterial strains	Управляемый перевод металлов в жидкую фазу Controlled metal transfer into liquid phase
Контроль полноты выщелачивания Leaching control	Бурение контрольных скважин с отбором проб и размещением приборов Installing monitoring wells with sampling and deployment devices Проходка выработок с отбором проб и документацией Excavation of workings with sampling and documentation	Получение объективных сведений о корректности технологии Obtaining objective information on correctness of technology

становятся пригодными для изготовления товарной продукции без ограничений. Параметры новой технологии требуют адаптации к различным условиям современного горного производства.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами извлечения металлов из полиметаллических руд Садонского месторождения и железистых кварцитов Лебединского месторождения в лаборатории Северо-Кавказского горно-металлургического института.

Вовлечение в производство колоссальных минеральных ресурсов создает новую сырьевую базу для горной промышленности и избавляет от необходимости вовлечения в эксплуатацию новых месторождений, что особо актуально ввиду дефицита ряда металлов для обеспечения национальной безопасности России.

Выщелачивание забалансовых руд открывает возможности получения редкоземельных элементов при химическом обогащении металлосодержа-

щих минералов, поскольку и они извлекаются в коллективный раствор [13].

Насыщение производства мощной крупногабаритной техникой стимулирует увеличение разубоживания и потерь руды, поэтому стратегия развития технологий рассматривает использование некондиционных запасов как компенсацию потерянному и разубоженного сырья [14].

Освоение технологий выщелачивания дает возможность рациональнее распоряжаться минеральными ресурсами, определяющими судьбу земной цивилизации [15].

Реализация указанного направления может быть ускорена разработкой средств и методов активации технологических процессов, например электро-химического выщелачивания золота из упорного минерального сырья [16].

Разработки указанного направления используются в процессах подготовки специалистов нового поколения [17]. Они рассматриваются как технологии ближайшего будущего [18].

Комбинирование технологий по предложенной схеме является механизмом реализации стратегии расширения сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений [19].

Поэтому работы по экономическому обоснованию разработки забалансовых руд как основного фактора повышения производственной мощности горных предприятий так актуальны [20].

Перспективы комбинированных механохимических технологий связаны, в первую очередь, с диверсификацией производства цветных, ценных и благородных руд, вскрываемых химическими реагентами. Во вторую очередь могут осваиваться руды менее вскрываемых металлов по мере оптимизации энергетических затрат на активацию процессов выщелачивания.

Условием успеха новой технологии является разработка методов селективного извлечения металлов из коллективного раствора.

Выводы

1. Выборочная отработка балансовых запасов рудных месторождений с переводом забалансовых запасов в разряд неактивных не отвечает принципам гуманного отношения к природным ресурсам.
2. Извлечение из добытых руд только титановых металлов с потерей остальных в хвостохранилищах увеличивает недостатки традиционных технологий добычи и переработки металлических руд.
3. Интересам ресурс- и природосбережения отвечает комбинированная технология, позволяющая извлекать часть балансовых руд для заводской переработки и усреднять содержание забалансовых руд до приемлемого с точки зрения выщелачивания значения.
4. Подземное выщелачивание металлов является перспективным направлением упрочнения сырьевой базы горно-металлургической отрасли, оздоровления экономики и решения экологических и социальных проблем.
5. Реализация технологии с выщелачиванием в промышленном производстве формирует новые проблемы: извлечение металлов из раствора выщелачивания, нейтрализация маточных растворов, повышение механической и химической стойкости рабочего органа активатора и др. Они составляют вторую очередь промышленного освоения инновационной технологии и требуют организации комплексных исследований.

В статье представлены результаты исследований, выполненных по программе Erasmus + 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP «Modernization of geological education in Russian and Vietnamese universities».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голик В.И., Разоренов Ю.И. Проектирование горных предприятий. – Новочеркасск: Набл, 2007. – 262 с.
2. Harris J.M., Roach B. Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach. – Armonk, New York: M.E. Sharpe, Inc., 2013. – 246 p.
3. Freeman A.M., Herriges J.A., Kling C.L. The measurement of environmental and resource values. Theory and methods. – New York, USA: RFF Press, 2014. – 325 p.
4. Комащенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 2. – С. 101–114.
5. Голик В.И., Брюховецкий О.С., Габараев О.З. Технологии освоения месторождений урановых руд. – М.: РГТУ, 2007. – 131 с.
6. Каплунов Д.Р., Юков В.А., Лавенков В.С. Сопоставление блокового и скважинного выщелачивания для подземной добычи медных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 3. – С. 7–14.
7. Dubiński J. Sustainable Development of Mining Mineral Resources // J. Sustain. Min. – 2013. – № 1. – P. 1–6.
8. Голик В.И. Специальные способы разработки месторождений. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 132 с.
9. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach // Proc. of the 3rd International Conference on Heap Leach Solution. – Lima, 2015. – P. 67–75.
10. 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.
11. Морозов А.А., Яковлев М.В. Вовлечение в переработку забалансовых урановых руд, образовавшихся при освоении месторождений Стрельцовского рудного поля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 12. – С. 166–174.
12. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – V. 7. – № 3. – P. 49–52.
13. Jordens A., Cheng Ying Ping, Waters K.E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals // Minerals Engineering. – 2013. – V. 41. – P. 97–114.

14. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations // SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference: Navigating the Global Waters. – Denver, United States, 2015. – P. 529–532.
15. Capilla A.V., Delgado A.V. The destiny of the earth's mineral resources. – London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. – 235 p.
16. Самусев А.Л., Миненко В.Г. Влияние параметров химико-электро-химического выщелачивания на извлечение золота из упорного минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 5. – С.134–140.
17. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology / Haifeng Wang, Yaqu He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye // Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141. – Berlin Heidelberg, 2012. – P. 77–83.
18. Seinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. – 2015. – V. 157. – P. 306–324.
19. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // Горный журнал. – 2013. – № 12. – С. 29–33.
20. Шелкунова Т.Г. Экономическое обоснование разработки забалансовых руд // Современные проблемы рыночного реформирования экономики: Сб. «Научные труды аспирантов, соискателей и преподавателей экономического факультета». – Владикавказ: Терек, 2005. – С. 45–52.

Поступила 15.12.2017 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственный технологический университет).

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

Ляшенко В.И., кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела Государственного предприятия «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии».

UDC 504.55.054:622(470.6)

CONDITIONS OF LEACHING NON-FERROUS METALS FROM NON-COMMERCIAL RESERVES

Vladimir I. Golik¹,
v.i.golik@mail.ru

Yuri I. Razorenov²,
yiri1963@mail.ru

Vasili I. Lyashenko³,
vilyashenko2017@gmail.com

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

² M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosvyashcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

³ Ukrainian Research, Designing and Survey Institute of Industrial Technology,
37, Bulvar Svobody, Zheltye Vody, 52204, Ukraine.

The relevance. Traditional technologies of underground development of ore deposits are characterized by irretrievable losses of non-commercial reserves in the ground. The alternative to traditional technologies is the technology of metals leaching in underground conditions without extracting the earth's surface, allowing production of non-commercial reserves.

The aim of the study is to prove technical and economic feasibility of leaching metals from sub-standard metal-bearing minerals while solving the problems related to this.

Method of the study problem is based on the analysis of the results of the industrial-experimental leaching non-commercial ores, and commercial ones on rocky fields with the investigation of metal extraction in product solution due to the technological exposure of a reagent solution on metal ores.

Results. The authors have proposed the algorithm of combining the alternative technologies of underground mining with the development of a compensation space for crushing non-commercial ores by excavating commercial ones; justified the principle of combining the technologies of mine treatment in traditional way and underground one with selective extraction of a part of commercial ores and formation of the compensation space required for fragmentation, where the non-commercial ore is removed with further leaching. The paper introduces the detailed understanding of the main processes of a new technology: blasting, draw, irrigation and intensification of leaching, and demonstrates the benefits of engaging non-commercial ores in manufacture by a new technology, including the utilization of mineral resources, strengthening the resource base, reducing the burden on the environment.

Conclusions. Combination of technologies which allows extracting a part of commercial ores for factory processing and averaging the content of non-commercial ores to the acceptable value within leaching, meets the interests of resource and nature preservation and it is a promising direction of strengthening the raw material base of mining industry, revitalizing the economy and addressing the environmental and social problems.

Key words:

Ore, mine, non-commercial reserves, leaching, metal, underground mining.

The paper introduces the results of the research carried out by the program Erasmus + 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP «Modernization of geological education in Russian and Vietnamese university».

REFERENCES

1. Golik V.I., Razorenov Yu.I. *Proektirovanie gornyykh predpriyatiy* [The design of mining enterprises]. Novocherkassk, Nabla Publ., 2007. 262 p.
2. Harris J.M., Roach B. *Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach*. Armonk, New York, M.E. Sharpe, Inc., 2013. 246 p.
3. Freeman A.M., Herriges J.A., Kling C.L. *The measurement of environmental and resource values. Theory and methods*. New York, USA, RFF Press, 2014. 325 p.
4. Komashchenko V.I., Vasilyev P.V., Maslennikov S.A. Technology of underground mining KMA – reliable raw material basis. *Proceedings of the Tula state University. Earth science*, 2016, no. 2, pp. 101–114. In Rus.
5. Golik V.I., Bryukhovetsky O.S., Gabaraev O.Z. *Tekhnologii osvoeniya mestorozhdeniy uranovykh rud* [Technology of developing uranium ore deposits]. Moscow, RGGU Publ., 2007. 131 p.
6. Kaplunov D.R., Yukov V.A., Lavenkov V.S. Comparison of block and borehole underground leaching for production of copper ore. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten*, 2017, no. 3, pp. 7–14. In Rus.
7. Dubiński J. Sustainable Development of Mining Mineral Resources. *J. Sustain. Min.*, 2013, no. 1, pp. 1–6.
8. Golik V.I. *Spetsialnye sposoby razrabotki mestorozhdeniy* [Special methods of field development]. Moscow, INFRA-M Publ., 2014. 132 p.
9. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach. *Proc. of the 3rd International Conference on Heap Leach Solution*. Lima, 2015. pp. 67–75.
10. Komashchenko V.I. Ecological and economic feasibility of disposal of mining waste for their processing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2015, no. 4, pp. 23–30. In Rus.

11. Morozov A.A., Yakovlev M.V. Involvement in processing of non-commercial uranium ores, formed at development of deposits of strel'tsovskoye ore field. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2016, no. 12, pp. 166–174. In Rus.
12. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 49–52.
13. Jordens A., Cheng Ying Ping, Waters K.E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 2013, vol. 41, pp. 97–114.
14. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations. *SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference: Navigating the Global Waters*. Denver, United States, 2015. pp. 529–532.
15. Capilla A.V., Delgado A.V. *The destiny of the earth's mineral resources*. London, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. 235 p.
16. Samusev A.L., Minenko V.G. Influence of chemical-electro-chemical leaching parameters on gold recovery from resistant mineral raw materials. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2016, no. 5, pp. 134–140. In Rus.
17. 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*. Berlin Heidelberg, 2012. pp. 77–83.
18. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 157, pp. 306–324.
19. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Expanding the raw material base of mining enterprises on the basis of complex use of mineral resources deposits. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 12, pp. 29–33. In Rus.
20. Shelkunova T.G. Ekonomicheskoe obosnovanie razrabotki zabalansovykh rud [Economic feasibility of non-commercial ore exploration]. *Sovremennyye problemy rynochnogo reformirovaniya ekonomiki. Sb. Nauchnye trudy aspirantov, soiskateley i prepodavateley ekonomicheskogo fakulteta* [Modern problems of market reforming of economics. Works of postgraduates and professors of the economic faculty]. Vladikavkaz, Terek Publ., 2005. pp. 45–52.

Received: 15 December 2017.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, professor, North-Caucasus Mining and Metallurgical Institute (state technological University).

Yuri I. Razorenov, Dr. Sc., professor, first vice-rector, South-Russian State Polytechnic University.

Vasily I. Lyashenko, Cand. Sc., head of research department, Ukrainian Research, Designing and Survey Institute of Industrial Technology.