

Д.Р. Каплунов, В.А. Юков

ОБ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ МЕДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*

Рассмотрены сочетания физико-технического, физико-химического способов и переработки материалов техногенных образований в комбинированных технологиях подземной разработки. Для оценки реализуемости вариантов использован метод принятия решений в условиях неопределенности. Установлены рациональные границы применения как двухкомпонентных, так и трехкомпонентных технологий.

Ключевые слова: Комбинированные технологии, подземная разработка, физико-технический, физико-химический способы, техногенные образования.

В настоящее время способ подземного выщелачивания широкого развития в масштабах страны не получил, хотя список металлов (минералов), которые можно добывать этим методом, достаточно велик. Пока методом подземного выщелачивания ведется промышленная добыча урана ЗАО «Депур», (Курганская обл.), ОАО «Хиагда» (Бурятская республика); меди – Гумешевское месторождение («Уралгидромедь» Свердловская обл.); золота – Гагаринское месторождение (ЗАО «Гепоиск» Свердловская обл.). Кучным выщелачиванием извлекают никель в Австрии и Турции (Каупат).

Известно, что многие отечественных и зарубежных предприятий успешно вовлекают в переработку некондиционные руды, хвосты обогащения и полезные пустые породы.

Представляется целесообразным определить возможные пределы совмещения разных технологий подземной добычи в пределах одного месторождения. В связи с этим рассматривается участок обширного месторождения сульфидных медных руд с запасами 20 млн т со средними условиями разработки: среднее содержание условной меди в балансовых

запасах 0,15%; для выщелачивания геологическое содержание немного превышает бортовое – 0,6%; содержание в хвостах – средневзвешенное по четырем хвостохранилищам уральских комбинатов – 0,12%. Годовая производительность рудника 1 млн т. Сопоставляются комбинации следующих горнотехнических систем:

- добыча богатой медной руды нисходящей слоевой системой с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями и переработкой добытой руды по обычной схеме: обогащение, металлургический передел, ФТ – физико-технический способ;

- подземное (блоковое) выщелачивание бедной по содержанию руды с отбойкой руд глубокими скважинами, магазинированием и выщелачивание инфильтрационным потоком реагента, с использованием схемы SX-EW (выщелачивание, экстракция, реэкстракция, электролиз), ФХ – физико-химический способ;

- вовлечение в переработку по схеме SX-EW материалов техногенного образования – хвостов обогащения, ТО.

Капитальные и эксплуатационные затраты первых двух горнотехнических систем, затраты на строитель-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-05-07771А.

ство обогатительной фабрики и себестоимость обогащения приняты по данным работы [1].

Техногенные образования представлены отходами горного производства. К ним относятся отвалы добытых забалансовых полезных ископаемых, горных пород вскрыши, а также от проходки подземных выработок; отходы переработки обогатительного и химико-металлургического производств. Подробно характеристика отходов горного и обогатительного переделов цветной и черной металлургии представлена в [2]. Там же приведены возможности их утилизации или переработки и некоторые положения по снижению негативного воздействия на атмосферу, по схемам осушения, по очистке шахтных вод.

При переработке кучным выщелачиванием извлечение для забалансовых руд обычно планируют на уровне 60–70%, для мелкодробленых хвостов оно выше – 75–80%. Извлечение меди цементацией на железном скрапе (на желобе) из продуктивных рудных растворов составляет 0,92–0,97%, из продуктивных растворов выщелачивания хвостов – 0,97–0,98%. Затраты на добычу, погрузку, транспорт и переработку материалов *ТО* определены с учетом опыта отечественных рудников, в частности Гайского ГОКа, и практики рудников Австралии, Канады и США по кучному выщелачиванию отвалов и хвостохранилищ месторождений благородных металлов [3–7]. Экономические показатели металлургического передела, особенно по применению технологической схемы SX-EW, определены по данным [8].

Расчет выполнен для длительно действующего предприятия, где уже существуют возможности по организации отработки материалов техногенных образований и их последующей переработки. Оценка реализуемости намеченных вариантов выполнена с

использованием адаптированного метода принятия решений в условиях неопределенности. Под условиями неопределенности понимается колебание исходных данных и показателей. Учитываемые переменные указаны в таблице. Отклонения всех учитываемых переменных от средней величины приняты равными 10%. Цена меди принята средней за 10 лет.

Суть метода состоит в сравнении двух показателей окупаемости инвестиций: минимального (r_m), при котором проект безубыточен, и возможного для данного проекта (r_p). Причем используется значение прибыли до выплаты налогов. Оценка выполняется на основе ограниченного набора существенно влияющих внешних (цена продукции, ставка дисконтирования) и внутренних (запасы, содержание, технология переработки) факторов.

Для определения случайной переменной, описывающая общую прибыль на начало отработки до выплаты налогов, можно записать следующее уравнение:

$$\begin{aligned} \Pi = & \bar{X}_1 \left[\kappa_{фт} \bar{X}_2 (\bar{X}_3 \bar{X}_5 - \bar{X}_4) + \right. \\ & + \kappa_{фх} K_1 \bar{X}_6 (\bar{X}_2 \bar{X}_5 - \bar{X}_8) + \\ & \left. + \kappa_{ТО} K_2 \bar{X}_9 (\bar{X}_{10} \bar{X}_5 - \bar{X}_{11}) \right] \end{aligned}$$

где \bar{X}_1 – годовая производительность по руде, т/г; $\kappa_{фт}$ – участие физико-технического способа добычи, доли ед.; \bar{X}_2 – содержание усл. меди в залежи при физико-техническом способе, доли ед.; \bar{X}_3 – общее извлечение при физико-техническом способе, доли ед., $\varepsilon_{фт} = \varepsilon_d \varepsilon_o \varepsilon_{мп}$; \bar{X}_4 – общие затраты физико-технического способа $\varepsilon_{фт} = c_d + c_o + c_{мп}$, долл./т; \bar{X}_5 – цена условной меди, долл./т; $\kappa_{фх}$ – участие физико-химического способа добычи, доли ед.; K_1 – коэффициент выравнивания количества извлекаемого металла; \bar{X}_6 – содержание в запасах

Исходные данные по определению реализуемости проекта

Показатели	Усл. обозн.	Величина	Отклонение
ФТ – физико-технический способ			
Отрабатываемые запасы, т/год	X_1	10 ⁶	10 ⁵
Среднее содержание условного металла (в пересчете на медь), доли ед.	X_2	0,015	0,0015
Общее извлечение условного металла, доли ед. в т.ч.: при добыче при обогащении при металлургическом переделе	X_3	0,85 95 93 96	0,085
Общие эксплуатационные расходы, долл/т на добычу на обогащение на металлургический передел	X_4	50,3 25,5 16,5 8,3	5,03
Цена условного металла (средняя за 10 лет), долл/т	X_5	6000	600
Общие капитальные вложения, млн долл.: добыча обогащение металлургический передел		108,5 68,2 24,1 16,2	
ФХ – физико-химический способ			
Среднее содержание условного металла (в пересчете на медь), доли ед.	X_6	0,006	0,0006
Общее извлечение условного металла, доли ед. в т.ч.: при добыче при обогащении при металлургическом переделе	X_7	0,70 75 96 97	0,07
Общие эксплуатационные расходы, долл/т на добычу на обогащение + на металлургический передел	X_8	23,3 7,7 15,6	2,33
Общие капитальные вложения, млн долл.: добыча обогащение и металлургический передел		69,2 50,0 19,2	
ТО – техногенные образования			
Среднее содержание условного металла (в пересчете на медь), доли ед.	X_9	0,0027	0,00027
Общее извлечение условного металла, доли ед. в т.ч.: при добыче при обогащении при металлургическом переделе	X_{10}	0,73 – 0,75 0,97	0,073
Общие эксплуатационные расходы, долл/т на добычу и транспорт на обогащение + на металлургический передел	X_{11}	6,7 3,1 3,6	0,67
Общие капитальные вложения, млн долл.: добыча обогащение и гидрометаллургический передел		15,5 4,5 11,0	

при физико-химическом способе добычи, доли ед.; \bar{X}_7 – общее извлечение при физико-химическом способе доли ед., $\varepsilon_{\text{фх}}^1 = \varepsilon_{\text{д}}^1 \varepsilon_{\text{о}}^1 \varepsilon_{\text{мп}}^1$; \bar{X}_8 – общие

затраты физико-химического способа $\varepsilon_{\text{фх}} = c_{\text{д}}^1 + c_{\text{о+мп}}^1$, долл./т; $\kappa_{\text{то}}$ – участие техногенных образований, доли ед.; K_2 – коэффициент выравнивания ко-

личества извлекаемого металла; \bar{X}_9 – содержание металла в техногенном образовании, доли ед.; \bar{X}_{10} – общее извлечение металла из техногенного образования, $\varepsilon_{\text{ТО}} = \varepsilon_{\text{о}}^{11} \varepsilon_{\text{МП}}^{11}$; \bar{X}_{11} – общие затраты вовлечения техноген. образования, $c_{\text{ТО}} = c_{\text{д}}^{11} + c_{\text{о+МП}}^{11}$, долл./т.

При разворачивании в ряды Тейлора вокруг каждого значения средней величины случайной переменной x_k получаем отклонение общей прибыли $\text{Var}_{(\Gamma)}$. Стандартное отклонение прибы-

ли равно корню квадратному из величины ее колебания:

$$\text{Станд. откл.} = \sqrt{\text{Var}_{(\Gamma)}}.$$

В расчетах вариантов комбинированных технологий капвложения принимались пропорционально их доле участи. Коэффициент выравнивания количества поучаемого металла для подземного блокового выщелачивания – ФХ способ с учетом разницы извлечения $K_1 = 3,03$ т/т, для переработки материалов ТО $K_2 = 6,5$ т/т.

Результаты представлены на рис. 1, 2, где рассмотрены комбинации двух способов отдельно: ФТ+ФХ и ФТ+ТО.

Сразу отметим, что результирующие кривые r_i , описывающие ФТ, ФХ способов и переработку материалов ТО располагаются значительно выше кривой безубыточности r_m , что свидетельствует о высокой эффективности применяемых технологий. В рассматриваемом диапазоне дисконтирования значения r_m изменяются от 1,6 до 5,05 при $i = 25\%$. Чтобы не уменьшать масштаб и сохранить наглядность, они на рисунках не показаны.

Вначале остановимся на сочетании ФТ и ФХ способов с последовательным увеличением доли участия ФХ способа в общем объеме добычи, рис. 1. В условиях действующего предприятия, где $i = 5\%$, при долевом участии ФХ способа в 20% результирующий показатель r_i слегка превышает базовый ($r_i = 11,45 > 11,34$). То же наблюдается в двух

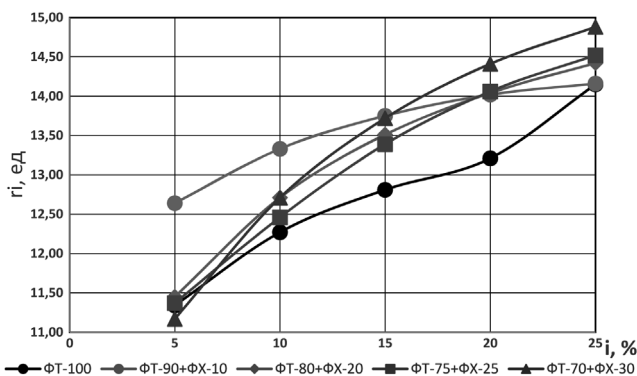


Рис. 1. Реализуемость вариантов комбинированной технологии ФТ + ФХ: i – норма дисконта; r_m – граница безубыточности; r_i – показатель окупаемости инвестиций по вариантам отработки: ФТ – физико-техническая технология в %; ФХ – физико-химическая в %

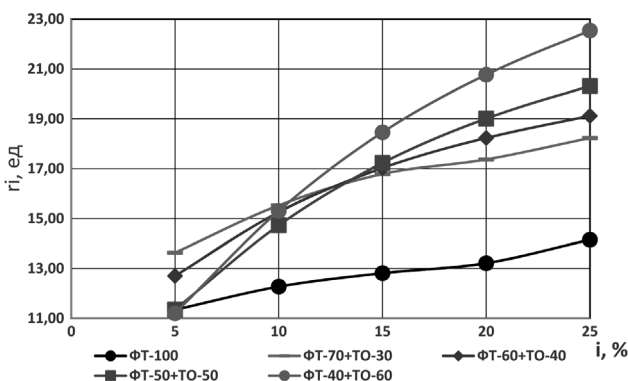


Рис. 2. Реализуемость вариантов комбинированной технологии ФТ + ТО: i – норма дисконта; r_m – граница безубыточности; r_i – показатель окупаемости инвестиций по вариантам отработки: ФТ – физико-техническая технология в %; ТО – вовлечение материалов техногенных образований в %

других диапазонах дисконтирования: $i = 10\%$, обычно применяемом при проектировании и $i = 15\%$, обычно рассматриваемом как желательный уровень прибыльности на вложенный капитал. В последующих диапазонах дисконтирования сильно снижается вероятность успеха проекта – вероятность заданной доходности разработок: при $i = 25\%$ вероятность успеха менее 75%. Результирующие показатели сохраняются примерно на том же уровне при увеличении доли ФХ способа до 25%. Но при 30% участии ФХ способа становятся ниже в двух первых диапазонах дисконтирования (5 и 10%) и слегка превышают базовые в последующих трех ($i = 15-25\%$), где резко возрастают риски успешной реализации проекта. Отсюда следует, что при проектировании комбинированной технологии доленое участие ФХ способа, представленного подземным (блоковым) выщелачиванием бедной по содержанию руды, не должно превышать 20–25% общей производительности рудника.

Последовательное увеличение доли участия переработки материалов $ТО$ в сочетании с $ФТ$ способом представлено на рис. 2. В условиях действующего предприятия, при $i = 5\%$, с участием $ТО$ в 50% результирующий показатель r_i равен базовому ($11,35 = 11,34$). В остальных диапазонах дисконтирования превышает базовый. При увеличении доли $ТО$ до 60% r_i становится ниже базового ($r_i = 11,20 < 11,34$), хотя превышает базовый в остальных диапазонах ($i = 15-25\%$). Вдвое более высокий допустимый уровень участия $ТО$ может быть объяснен следующим. Меньшей капиталоемкостью сравниваемого варианта по отношению к базовому ($ФТ-100$). При использовании материалов $ТО$ учитываются затраты только на переработку уже находящихся на поверхности в фракционированном состоянии.

Следует отметить, что в пограничной области изменение капвложений для комбинации $ФТ + ТО$ на $0,1 \times 10^6$ (100,000) долл. резко отражается на величине r_i . При $i = 5\%$ (действующее предприятие) в базовом варианте ($ФТ-100$) с погашением капвложений в 5,4 млн долл./год $r_i = 11,34$, а в варианте $ФТ-50 + ТО-50$ при годовой амортизации в 3,2 млн долл. $r_i = 11,35$ – варианты равнозначны. Если удастся снизить инвестиции на $0,1 \times 10^6$ долл./год, то результирующий показатель поднимется до 11,70, что как бы свидетельствует о возможности еще некоторого увеличения доли $ТО$. В варианте $ФТ-40 + ТО-60$ в этом диапазоне r_i равен 11,20, что хуже базового. Но если возможно снижение годового погашения капвложений на ту же величину, то r_i возрастает до 11,59, что превышает показатель базового варианта ($ФТ-100$ равный 11,34), а также свидетельствует об относительной подвижности границ сочетания технологий.

При проектировании комбинированной технологии с участием материалов $ТО$ их рациональная доля, по-видимому, будет определяться объемом имеющегося (накопленного) материала. Для рудника с добычей 1 млн т в год при $K_2 = 6,5$ (коэффициент выравнивания количества металл при отработке $ТО$) доля в 15% означает переработку 975 тыс. т/год материала хвостов и почти равняется годовой добычей рудника; при доле в 30% – 1,950 млн т/год – превышает годовую добычу почти вдвое; при доле в 50% – это 3,250 млн т/год – превышает более чем втрое.

При отработке геологических запасов в 20 млн т количество добытой горной массы, размещаемой в отвалах на земной поверхности в зависимости от применяемой системы разработки составляет 2,4–2,7 млн т; количество добытой и измельченной горной мас-

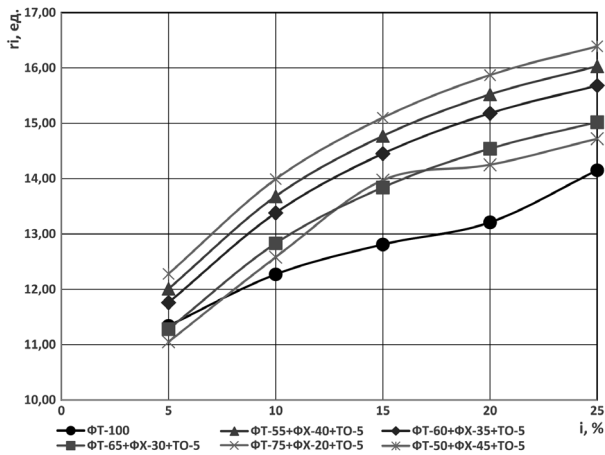


Рис. 3. Реализуемость вариантов комбинированной технологии $FT + FX + TO$ при ограниченном участии TO : i – норма дисконта; r_m – граница безубыточности; r_i – показатель окупаемости инвестиций по вариантам отработки: FT – физико-техническая технология в %; FX – физико-химическая в %; TO – вовлечение материалов техногенных образований в %

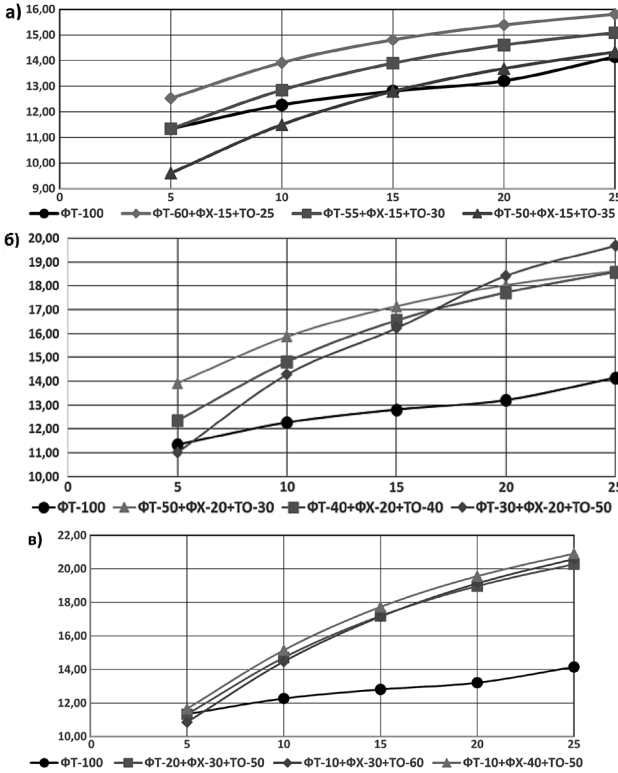


Рис. 4. Реализуемость вариантов комбинированной технологии $FT + FX + TO$ при фиксированном участии FX : а) $FX = 15\%$; б) $FX = 20\%$;

сы в хвостохранилищах на земной поверхности равно 17,4–17,5 млн т [2]. В этом случае целесообразно 15% вовлечение в переработку материалов TO – сопоставимое с годовой производительностью рудника по руде и примерно совпадающее с продолжительностью отработки участка месторождения. При больших запасах материалов, накопленных за предыдущий период отработки месторождения, в том числе и карьерами, возможно увеличение доли материалов TO до 50–60%.

На рис. 3, 4 представлены возможные результаты реализуемости комбинированной технологии с участием всех трех компонентов: $FT + FX + TO$.

При небольших запасах материалов TO , ограниченных 5% участием (рис. 3) примерное равенство результирующих показателей r_i достигается при 30% участии FX способа (11,28≈11,34). Затем при 35% участии FX (вариант $FT-60 + FX-35 + TO-5$) показатель окупаемости инвестиций превышает базовый ($r_i = 11,76 > 11,34$). Далее тенденция идет по нарастающей: при 40% это 12,01, а при 45% – 12,28. При постоянном, ограниченном участии TO в трехкомпонентной комбинированной технологии замена FT на FX способ оправдана, начиная с доли FX способа в 30%. Предел, по-видимому, будет ограничен технико-организацион-

ными возможностями совмещения первых двух технологий, поскольку переработка материалов *ТО* организуется отдельно на поверхности.

Возможные пределы участия *ТО* при фиксированном значении *ФХ* способа представлены на рис. 4. Отправным показателем являлся рациональный предел совмещения *ФТ* и *ФХ* способов при сочетании двух технологий. На рис. 4, а в варианте *ФТ-55 + ФХ-15 + ТО-30* достигается равенство с базовым вариантом. При меньшей доле *ТО-25%* результирующий показатель лучше ($r_i = 12,53 > 11,34$), при большей – хуже ($r_i = 9,61 < 11,34$).

При фиксированной доле *ФХ* способа в 20%, рис. 4, б, рациональное участие *ТО* находится между 40% и 50%: r_i при 40% больше базового, при 50% – меньше. Если в трехкомпонентной комбинации доля *ФХ* увеличивается до 30%, рис. 4, в, то возможность привлечения материалов *ТО* возрастает до 50%. А при *ФХ-40* (40% участие *ФХ* способа) привлечение хвостов обогащения превышает 50%. При этом доля *ФТ* способа может составить менее 10%.

С одной стороны, намечается переход к двухкомпонентной комбинации *ФХ + ТО*, что не рассматривалось. В настоящее время еще не все горнодобывающие предприятия организуют переработку материалов *ТО*, в том числе и полезных пустых пород. Кроме того, *ФХ* способ на месторождениях в качестве самостоятельного или ведущего применяется в весьма ограниченных объемах.

С другой стороны, при высоком доле участия *ТО* (>20%) вновь возникает вопрос возможности и необходимости переработки большого количества материалов *ТО* – хвостов обогащения. Вовлечение 50% соответствует 3,250 млн т/год, что более чем втрое превышает годовую добычу.

Отметим, что и при комбинированных технологиях с тремя компонентами: *ФТ*, *ФХ*, *ТО* в пограничной области изменение капвложений на величину в 0,1 млн. долл. также резко сказывается на результирующем показателе варианта – окупаемости инвестиций r_i .

Таким образом, предварительное изучение при ограниченном количестве показателей подтвердило высокую эффективность рассмотренных комбинированных технологий, что является основой для более детальной проработки в конкретных проектах, и позволило установить рациональные границы их применения.

Следует учесть, что при проектировании:

- двухкомпонентных комбинированных технологий *ФТ + ФХ* и *ФТ + ТО*
 - долевого участия *ФХ* способа обработки бедной по содержанию руды ограничивается 20–25% общей производительности рудника;
 - вовлечение в переработку материалов *ТО* – хвостов обогащения целесообразно в размере 15% при небольшом объеме запасов материалов и может быть увеличено до 50–60% при больших запасах;
- трехкомпонентных комбинированных технологиях: *ФТ + ФХ + ТО*
 - при постоянном (5%) участии *ТО* рационально замена *ФТ* на *ФХ* способ, начиная с 30% доли *ФХ*;
 - при больших возможностях вовлечения материалов *ТО* его участие зависит от возможной доли *ФХ* способа и колеблется от 25 до 50% и более при изменении участия *ФХ* в пределах 15–40%.

В данной работе все выкладки сделаны для одной мощности подземного рудника, в дальнейшем следует определить являются ли найденные сочетания отдельных составляющих комбинированных технологий неизменными при разной мощности рудника.

1. Каплунов Д.Р., Юков В.А. Оценка области эффективного применения систем подземной разработки меднорудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 7. – С. 3–9.

2. Каплунов Д.Р., Юков В.А. О классификации техногенных образований пустых пород и некондиционных руд при подземной разработке месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. – 2008. – № 1. – С. 21–24.

3. Каплунов Д.Р., Юков В.А. К оценке эффективности освоения техногенных образований // Маркшейдерский вестник. – 2008. – № 5. – С. 8–12.

4. Каплунов Д.Р., Юков В.А. Эффект от переработки материалов техногенных образований // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 12. – С. 72–76.

5. Красавин В.П., Радченко Д.Н., Милкин Д.А. и др. Исследование технологии

выщелачивания отходов добычи руд // Недропользование XXI век. – 2009. – № 3. – С. 38–41.

6. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Пешков А.М. и др. Обоснование параметров и режима выщелачивания сырья техногенных образований, сопутствующих разработке медно-колчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 3. – С. 340–350.

7. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Милкин Д.А. и др. Исследование процессов выщелачивания ценных компонентов из текущих хвостов обогащения медно-колчеданных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 256–268.

8. Ашихмин А.А., Галбаатар Г., Дмитриев А.А., Ясько Т.А. Экономика, организация и управление горными предприятиями цветной металлургии. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 46 с. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Каплунов Давид Родионович – чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник,
Юков Владимир Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Институт проблем комплексного освоения недр РАН, e-mail: info@ipkonran.ru.

UDC 622.275

APPLICATION FIELD OF COMBINED TECHNOLOGIES OF COPPER DEPOSITS UNDERGROUND MINING

Kaplunov D.R.¹, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Chief Researcher,
Yukov V.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: info@ipkonran.ru.

The combinations of physicochemical and physicochemical methods of exploitation and processing of manmade mineral formations in combined technologies of underground mining are considered. The method of decision-making under uncertainty is used for the evaluation of combination version feasibility. Rational application limits of two-component and three-component technology are identified.

Key words: combined technologies, underground mining, physicochemical, physicochemical methods, manmade mineral formations.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research no 15-05-07771A.

REFERENCES

1. Kaplunov D.R., Yukov V.A. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2014, no 7, pp. 3–9.
2. Kaplunov D.R., Yukov V.A. *Marksheiderskii vestnik*. 2008, no 1, pp. 21–24.
3. Kaplunov D.R., Yukov V.A. *Marksheiderskii vestnik*. 2008, no 5, pp. 8–12.
4. Kaplunov D.R., Yukov V.A. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2008, no 12, pp. 72–76.
5. Krasavin V.P., Radchenko D.N., Milkin D.A. *Nedropol'zovanie KhKhI vek*. 2009, no 3, pp. 38–41.
6. Ryl'nikova M.V., Radchenko D.N., Peshkov A.M. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2010, no 3, pp. 340–350.
7. Ryl'nikova M.V., Radchenko D.N., Milkin D.A. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2010, no 2, pp. 256–268.
8. Ashikhmin A.A., Galbaatar G., Dmitriev A.A., Yas'ko T.A. *Ekonomika, organizatsiya i upravlenie gornymi predpriyatiyami tsvetnoi metallurgii* (Economy, organization and management in nonferrous metals industry), Moscow, Izd-vo MGTU, 2004, 46 p.