

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271:622.7

МАЛООТХОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОСВОЕНИЯ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ СХЕМ ВЫЕМКИ И ПЕРЕРАБОТКИ РУД

Г. В. Секисов, А. Ю. Чебан

*Институт горного дела ДВО РАН,
E-mail: chebanay@mail.ru, ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Представлен комплекс технологических решений, обеспечивающих существенное повышение сквозного извлечения полезных компонентов при разработке сложноструктурных рудных месторождений. В качестве критерия оценки эффективности такой разработки с помощью комбинированных схем выемки и переработки предлагается использовать максимальный суммарный чистый дисконтированный доход от добычи и переработки кондиционных руд и некондиционного минерального сырья, а также отходов горно-обогатительного производства, получаемый за весь период эксплуатации месторождения. Применение данного критерия позволяет установить оптимальные границы содержания полезного компонента для выделения технологических типов и сортов руд. Эксплуатационные блоки разделяются по геолого-технологическим типам, определяемым текстурно-структурными особенностями руд и их вещественным составом. В сложноструктурном блоке выделяются зоны различных промышленных сортов: особо богатые, богатые, рядовые, бедные и особо бедные руды. Ведется опережающая механическая выемка особо богатых руд с направлением их на автоклавное или сорбционное выщелачивание. После взрывного рыхления оставшиеся сорта руд подаются на обогатительную фабрику либо на кучное выщелачивание. Данная технология позволяет повысить сквозное извлечение металлов из рудного блока.

Сложноструктурный блок, типы руд, сорта руд, комбинированная выемка и переработка руд, извлечение металла, критерий эффективности, ресурсосбережение

DOI: 10.15372/FTPRPI20210610

Наиболее важными требованиями при разработке месторождений полезных ископаемых являются: достижение оптимальных технико-экономических показателей; выполнение плановых заданий по добыче полезного ископаемого с соблюдением принятых кондиций; осуществление мер по обеспечению безопасных условий труда работников, охране окружающей среды и рациональному использованию недр [1–4]. Основные показатели, характеризующие эффективность работы горного предприятия, — прибыль и уровень рентабельности, фондоотдача, показатели полноты извлечения запасов минерального сырья, производительность

труда и др. [5, 6]. Достижение максимального эффекта должно обеспечиваться принятием оптимальных технологических и организационных решений с учетом природно-геологических условий разрабатываемого месторождения [1]. Академиком РАН М. И. Агошковым в качестве критерия эффективности технологии рассматривалась масса прибыли, получаемой в зависимости от полноты извлечения руд из недр, потери полезного ископаемого косвенно учитывались через массу извлекаемой ценности [5].

В связи с истощением минерально-сырьевой базы в отработку вовлекаются месторождения или их отдельные участки, характеризующиеся сложной структурой, изменяющимся вещественным составом руд и их текстурно-структурными особенностями. Разработка сложно-структурных эксплуатационных блоков без селективной выемки и достаточно качественного усреднения приводит к неравномерности состава рудной массы, поступающей на обогащение, что ведет к недостаточно высокому сквозному извлечению металлов при переработке руд [7]. Для поддержания высокой эффективности работы горно-обогатительного предприятия должны соблюдаться условия по показателям качества обогащаемых руд, в частности раздельная добыча по типам и сортам, предварительная сортировка рудной массы с удалением породных включений и некондиционной руды, раздельная переработка технологически несовместимых типов и сортов, обеспечение постоянного содержания в рудном потоке полезных компонентов и вредных примесей [8].

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

С точки зрения управления минеральными ресурсами важными факторами являются изменчивость в распределении полезных компонентов в границах рудных тел. В связи с этим добыча может рассматриваться как управление двумя взаимосвязанными процессами: последовательностью извлечения руд из недр и отделением их составляющих с требуемым содержанием из рудной массы [9]. В настоящее время горные технологии должны развиваться и совершенствоваться на основе соблюдения принципов малоотходности и ресурсосбережения [10].

При разработке рудных месторождений подготовка пород к выемке в основном осуществляется с применением буровзрывных работ. При взрывной подготовке сложноструктурного рудного блока к выемке происходит перемешивание в приконтактной зоне полезного ископаемого и вмещающих пород, в результате чего возникают потери руд и их разубоживание, происходит перемешивание руд различных сортов. Согласно [11], при отработке сложноструктурных рудных тел изменчивой формы при высоте уступа 5 м и выемке руды экскаватором с продольными заходками нормативы разубоживания и пересортицы добываемой руды составляют 24 – 28 %, при этом большие значения характерны для богатых руд.

Необходимо также отметить эксплуатационные потери, вызванные разлетом отдельных кусков на расстояние 300 – 400 м за границу карьерного поля, переносом тонких фракций переизмельченных взрывом пород с пылевоздушным облаком [12]. При взрыве в области горного массива, прилегающей к взрывной скважине, образуется зона переизмельчения горных пород, рудная масса которой не поддается сортировке и содержит большое количество шламообразующих фракций, т. е. мелких фракций руды при последующей механической рудоподготовке (в процессах дробления и мельничного измельчения), продуцирующих шламы [13 – 15]. Шламы отрицательно влияют на флотацию: обладая большой удельной поверхностью и повышенной активностью, они поглощают значительную часть вводимого реагента, снижают скорость флотации [16]. Невозможность перевода в пенный продукт тонких шламовых частиц обусловлена образованием устойчивой суспензии, в которой сохраняется прочная опосредованная связь между тонкими частицами.

Согласно известным технологическим схемам, кондиционная руда штокверка, включающая особо богатые, богатые, рядовые и бедные составляющие (сорта) после селективной добычи, несмотря на разные текстурно-структурные характеристики и вариации минерального состава, усредняется и перерабатывается унифицировано с использованием одной технологической линии с гравитационным, флотационным или флотогравитационным обогащением с последующим гидрометаллургическим или биогидрометаллургическим переделом концентратов. Особо бедные руды отправляются на склад временно некондиционной руды, по существу — в отвал. Недостаток данного подхода — сложность обеспечения качественной рудоподготовки, эффективность которой обусловлена не только степенью дезинтеграции рудной массы, выходом сростков рудных и жильных минералов, их переизмельченных (шламовых) зерен, но и рядом других параметров, определяющих извлечение полезных компонентов в конечный продукт переработки и его качество. Для месторождений комплексных руд такими параметрами являются степень однородности твердой (минеральной) фазы пульпы по минеральному и фракционному составу и контрастность физических и/или физико-химических свойств рудных и жильных минералов, для золоторудных объектов — соотношение различных форм нахождения золота в руде и дефектность кристаллических решеток минералов-концентратов дисперсной, химически связанной и инкапсулированной форм его нахождения [17]. Таким образом, не всегда обеспечиваются рациональные характеристики руды, подаваемой на обогащение. Происходит снижение среднего содержания полезного компонента в руде из-за перемешивания с бедными рудами, что снижает общее извлечение металла. Низкое извлечение полезного компонента в ряде случаев вызвано сложными формами его нахождения и недостаточно гибкими технологиями переработки разнокачественных руд.

Перспективным направлением является раздельная переработка руд сложноструктурных месторождений, при которой стандартная технология используется для переработки богатых и основной части рядовых руд, продуктов сортировки контрастных бедных руд, а технология кучного выщелачивания — для переработки бедных и части рядовых руд, разубоженной рудной массы и хвостов обогащения и сортировки. Переработка богатых и основной части рядовых руд осуществляется после усреднения технологически совместимых сортов или только при внутрисортовом усреднении после соответствующей стадии дезинтеграции (для исключения переизмельчения относительно низкопрочных руд или руд с более крупными зернами рудных минералов при недостаточной степени раскрытия рудных минеральных зерен руд повышенной прочности) [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как правило, участки особо богатых и богатых руд при относительно небольших объемах в ряде случаев содержат основные запасы металла месторождения. Так, на одном из золото-медных месторождений скарнового типа в богатой руде, составляющей 13.12 % объема со средним содержанием золота 18.6 г/т, содержится 70.73 % запасов золота, при этом в 1.21 % особо богатой руды с содержанием более 100 г/т содержится 35.65 % запасов золота [18]. При отработке выемочного блока целесообразно обеспечить опережающую высокоселективную выемку локальных участков особо богатых руд до проведения взрывного рыхления блока для исключения их перемешивания с рудами, имеющими более низкое содержание полезного компонента. Извлечение особо богатых руд может вестись с использованием механических средств выемки [19]. Затем добытая особо богатая руда может направляться на переработку

с применением передовых технологий, обеспечивающих максимальное извлечение металла из руды, а хвосты ее обогащения и сортировки (содержание золота и других полезных компонентов в которых будет сопоставимо с бедными рудами) после окомкования направляться на кучное выщелачивание.

Авторами предлагается усовершенствованная комбинированная технология выемки и переработки руд сложноструктурных месторождений цветных и благородных металлов, в соответствии с которой на основе минералого-геохимических исследований, включающих электронную микроскопию и геотехнологическое тестирование крупнообъемных проб, осуществляется глубокое дифференцирование руд по типам, отражающим не только особенности вещественного состава, текстурно-структурных характеристик, но и соотношение форм нахождения благородных металлов, включая инкапсулированные и химически связанные, дисперсные. Например, исходя из разницы в технологических свойствах и содержании полезного компонента, а также с учетом возможности гибкого использования технологических схем переработки при освоении Дарасунского золоторудного месторождения целесообразно выделять следующие геолого-технологические типы руд: жильные, штокверковые и минерализованные околожильные метасоматиты. Внутри типов руд имеются сорта. Сорта руд предлагается разделять по пяти уровням содержания основного полезного компонента: особо богатые руды с содержанием золота более 25 г/т; богатые руды с содержанием 10–25 г/т; рядовые — 2.5–10 г/т; бедные — 1.0–2.5 г/т; особо бедные — 0.3–1.0 г/т. Среднее содержание золота по сортам руды составляет: особо богатые руды — 34 г/т; богатые — 16 г/т; рядовые — 5.5 г/т; бедные — 1.6 г/т; особо бедные — 0.5 г/т. Схема выемки и переработки руд сложноструктурного блока представлена на рисунке.

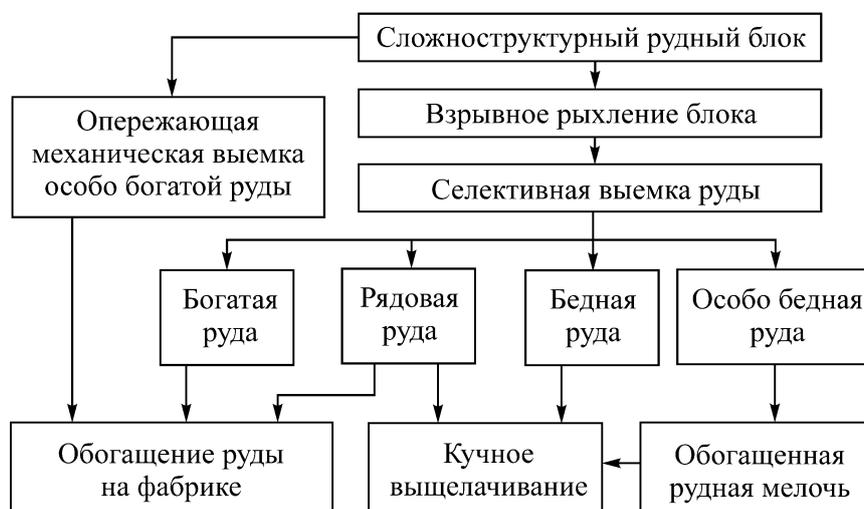


Схема выемки и переработки руд сложноструктурного блока

Особо богатые руды могут перерабатываться с предварительным получением концентрата посредством сепарации, с использованием гравитационного предобогащения с выводом в отдельный гравиконцентрат крупного золота и последующей или прямой флотации. Возможна также и прямая гидрометаллургическая переработка без предварительного обогащения при аномально высоких локальных концентрациях полезного компонента. Дорогостоящий способ переработки особо богатых руд с применением автоклавного выщелачивания позволит получить наиболее высокие показатели извлечения металла.

Для богатых руд предполагается использование технологий флотогравитационной или флотационной переработки с получением концентрата, направляемого на гидрометаллургический передел. Поскольку в кеках цианирования хвостах флотации и сорбционного выщелачивания содержание полезного компонента сопоставимо с таковыми для бедных руд, кеки и хвосты целесообразно подвергать последующей переработке с помощью физико-химических геотехнологий (кучное или скважинное выщелачивание).

Рядовая руда подлежит сортировке и усреднению и далее, в зависимости от ее особенностей, перерабатывается с применением кучного выщелачивания. При этом кучное выщелачивание из упорных руд должно вестись специальными активированными растворами, обеспечивающими окисление сульфидных минералов и снижение сорбционной емкости углистых включений, как правило, до орошения штабеля раствором, содержащим комплексообразователи и растворенный кислород [17, 20]. Для переработки хвостов обогащения методом кучного выщелачивания и снижения эффектов кольматации должно использоваться окомкование тонких и мелких фракций с добавлением в минерально-цементную смесь также активированных растворов. Учитывая относительно высокое содержание для кучного выщелачивания полезного компонента, необходимо провести дробление рудной массы до крупности не менее 10 мм, а также осуществить пропитку материала активированными растворами на стадии окомкования. Современные технологии кучного выщелачивания позволяют извлекать из руды 60–80 % металла [20–22]. Бедную руду, за исключением случаев высокой контрастности по содержанию полезного компонента, предполагающих возможность сепарации, следует перерабатывать кучным выщелачиванием (после дробления рудной массы до размера 10–20 мм), без окомкования.

Предлагается извлекать из некондиционной особо бедной руды обогащенную полезным компонентом рудную мелочь. Разработана конструктивная схема одноковшового экскаватора с просеивающим ковшом, который может вести выделение обогащенной рудной мелочи непосредственно во время выемочно-погрузочного процесса [23]. Рудная мелочь системой пневмотранспортирования направляется в специальный накопительный контейнер. По предварительным оценкам, рудная мелочь размером – 10 мм составляет 5–7 % от всего объема особо бедных руд, при этом в ней может содержаться около 40–50 % всего металла, находящегося в особо бедной руде. Просеянная рудная мелочь некондиционной руды может быть направлена на переработку совместно с кондиционной бедной рудой, в результате чего будет извлечено до 30–35 % металла, содержащегося в некондиционной руде, отправляемой на склад временно некондиционной руды, что даст общую прибавку извлечения на уровне 1.0–1.5 %. Кроме того, часть некондиционной руды можно использовать для формирования основания штабеля для кучного выщелачивания кондиционной бедной руды, что позволит извлечь еще некоторое количество металла.

Проведена сравнительная технико-экономическая оценка эффективности предлагаемой технологии освоения сложноструктурного золоторудного месторождения с применением комбинированной схемы добычи и переработки минерального сырья и традиционных технологий горно-обогачительного производства. В табл. 1 представлены результаты расчетов по извлечению металла в концентрат из жильного типа руд. Используя комбинацию селективной выемки, сортировки и отдельной переработки разнокачественных руд, возможно существенно увеличить полноту и комплексность использования запасов сложноструктурного блока.

ТАБЛИЦА 1. Показатели извлечения металла по сортам руд, %

Сорт руды	Доля руды	Доля металла	Среднее содержание металла в руде, г/т	Извлечение металла в концентрат	Доля извлеченного металла
Традиционная технология переработки руды общим потоком на фабрике					
Кондиционная	65.3	96.0	7.30	81	77.8
Некондиционная (особо бедная)	34.7	4.0	0.59	—	—
Итого руды	100.0	100.0	5.14	—	77.8
Традиционная технология раздельной переработки руд (на обогатительной фабрике и кучным выщелачиванием)					
Кондиционная богатая	37.1	84.3	11.69	82	69.2
Кондиционная бедная	28.2	11.7	2.14	65	7.6
Некондиционная (особо бедная)	34.7	4.0	0.59	—	—
Итого руды	100.0	100.0	5.14	—	76.8
Предлагаемая технология раздельной переработки					
Кондиционная (особо богатая)	3.0	19.8	34.0	96	19.0
Кондиционная (богатая)	9.8	34.0	17.8	84	28.5
Кондиционная (рядовая)	24.3	30.5	6.45	80	24.4
Кондиционная (бедная)	28.2	11.7	2.14	65	7.6
Некондиционная (особо бедная)	34.7	4.0	0.59	65	1.1
Итого руды	100.0	100.0	5.14	—	80.7

В табл. 2 приведены результаты расчетов себестоимости продукции при использовании традиционных и предлагаемой технологий.

ТАБЛИЦА 2. Экономические показатели технологий, %

Сорт руды	Доля руды	Относительная стоимость добычи и переработки руды		Удельная относительная стоимость металла
		приведенная	удельная	
Традиционная технология переработки руды общим потоком на фабрике				
Кондиционная	65.3	100	83.0	100.0
Некондиционная (особо бедная)	34.7	40	17.0	
Итого руды	100.0	—	100.0	
Традиционная технология раздельной переработки руд (на обогатительной фабрике и кучным выщелачиванием)				
Кондиционная богатая	37.1	100	53.5	85.9
Кондиционная бедная	28.2	65	26.4	
Некондиционная (особо бедная)	34.7	40	20.1	
Итого руды	100.0	—	100.0	
Предлагаемая технология раздельной переработки				
Кондиционная (особо богатая)	3.0	160	6.7	84.4
Кондиционная (богатая)	9.8	100	13.7	
Кондиционная (рядовая)	24.3	95	32.2	
Кондиционная (бедная)	28.2	65	25.5	
Некондиционная (особо бедная)	34.7	—	21.9	
Итого руды	100.0	—	100.0	

При разработке всех разновидностей руд формируются отходы, содержащие недоизвлеченный полезный компонент, который можно извлечь с помощью соответствующих технологий выщелачивания [24]. Количество недоизвлеченного металла может составлять до 30 % и более от исходного количества в недрах. Использование активационного выщелачивания позволяет своевременно удалять из отходов токсичные компоненты и локально осаждают их или извлекать дешевыми сорбентами.

При осуществлении предлагаемой технологии раздельной переработки руд остается недоизвлеченным ~ 19 % ценного компонента в отходах обогащения, штабеле кучного выщелачивания и на складе временно некондиционной руды. В их числе хвосты и кеки, полученные при переработке особо богатых, богатых и рядовых руд, которые содержат около 12.5 % исходного металла.

Укрупненные расчеты, основанные на данных экспериментальных и опытно-промышленных испытаний, показывают возможность доизвлечения из хвостов и кеков от 30 до 50 % содержащегося в них металла методами выщелачивания с использованием подготовленных в электрофотохимических реакторах растворов, содержащих активные гидратированные формы кислорода [25]. После доизвлечения полезного компонента из отходов горно-обогатительного производства оставшаяся минеральная масса, содержащая токсичный для биоты мышьяк, может служить основным компонентом твердеющей закладки при ведении подземных горных работ, что исключит последующее загрязнение окружающей среды.

В качестве критерия оценки эффективности разработки сложноструктурного рудного месторождения с применением комбинированных схем переработки предлагается использовать суммарный максимальный чистый дисконтированный доход (ЧДД), получаемый за весь период эксплуатации месторождения. В общем виде критерий оценки эффективности с учетом возможности последующей переработки хвостов обогащения и кеков металлургического передела богатых руд запишется следующим образом:

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+E)^t} [Q_{it}^b c_i^b k_{ni}^b k_{oi} k_{mi} (C_t - Z_t^b) + Q_{it}^r c_i^r k_{ni}^r k_{vi}^r (C_t - Z_t^r) + Q_{it}^n c_i^n k_{ni}^n k_{vi}^n (C_t - Z_t^n) + Q_{it}^b c_i^b k_{ni}^b (1 - k_{oi}) k_{vi}^x (C_t - Z_t^x) + Q_{it}^b c_i^b k_{ni}^b k_{vi}^k (1 - k_{oi})(1 - k_{mi})(C_t - Z_t^k)] \rightarrow \max,$$

где N — число разрабатываемых блоков; T — время отработки месторождения, лет; E — коэффициент приведения разновременных затрат; t — год приведения; i — индекс рудного блока; Q_{it}^b , Q_{it}^r , Q_{it}^n — количество добываемой богатой, рядовой и некондиционной руды соответственно; c_i^b , c_i^r , c_i^n — содержание полезного компонента соответственно в богатой, рядовой и некондиционной руде в i -м блоке; k_{ni}^b , k_{ni}^r , k_{ni}^n — коэффициент извлечения из недр соответственно богатой, рядовой и некондиционной руды для i -го блока; k_{oi} , k_{mi} — коэффициент извлечения полезного компонента при обогащении и при металлургическом переделе; C_t — цена полезного компонента в t -м году; Z_t^b , Z_t^r , Z_t^n , Z_t^x , Z_t^k — затраты на полный технологический цикл по извлечению полезного компонента в t -м году соответственно из богатой, рядовой, некондиционной руды, хвостов и кеков; k_{vi}^r , k_{vi}^n — коэффициент извлечения полезного компонента при кучном выщелачивании соответственно рядовой и некондиционной руды; k_{vi}^x , k_{vi}^k — коэффициент извлечения полезного компонента при кучном выщелачивании из хвостов обогащения и кеков металлургического передела богатой руды.

Использование данного критерия позволяет определять оптимальные границы содержания полезного компонента для выделения технологических свойств руд.

ВЫВОДЫ

Предлагаемая технология освоения сложноструктурных месторождений основана на применении комбинированных схем выемки и переработки руд, обеспечивающих гибкость технологического процесса, в результате чего достигается повышение сквозного извлечения металла и снижение его удельной стоимости. В частности, введение опережающей механической выемки зон особо богатых руд с последующей их переработкой с применением автоклавного выщелачивания обеспечивает наиболее высокие показатели извлечения металла. Выемка из недр некондиционных особо бедных руд с применением экскаватора с просеивающим ковшом позволяет отделить обогащенные полезным компонентом мелкие фракции, которые направляются на кучное выщелачивание. В качестве критерия оценки эффективности отработки месторождения использован суммарный максимальный чистый дисконтированный доход, определяющий оптимальные границы содержания полезного компонента для выделения технологических свойств руд и учитывающий переработку хвостов обогащения и кеков металлургического передела богатых руд.

Расчеты показывают, что применение данной технологии на 3–4% увеличивает сквозное извлечение металла по сравнению с традиционными технологиями. Последующее вовлечение в переработку отходов обогащения с использованием активационного выщелачивания дает возможность извлечь дополнительное количество металла и утилизировать вторичные отходы, используя их в качестве наполнителя закладки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюховецкий О. С., Бунин Ж. В., Ковалев И. А. Технология и комплексная механизация разработки месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1989. — 300 с.
2. Dimitrakopoulos R. Orebody modeling and strategic mine planning: old and new dimensions in a changing World., Proc. Int. Symp., Western Australia, 2009.
3. Menabde M., Froyland G., Stone P., and Yeates G. Mining schedule optimization for conditionally simulated orebodies, Orebody Modeling and Strategic Mine Planning, Spectrum Series, 2007. — P. 91–100.
4. Ордин А. А., Клишин В. И. Оптимизация технологических параметров горнодобывающих предприятий на основе лаговых моделей. — Новосибирск: Наука, 2009. — 165 с.
5. Агошков М. И., Гольдман Е. Л., Кривенков Н. А. Экономика горнорудной промышленности. — М.: Недра, 1986. — 264 с.
6. Sacceta L. and Hill S. An application of branch and cut to open pit mine scheduling, J. Global Optimization, 2003, Vol. 27. — P. 349–365.
7. Чебан А. Ю., Секисов Г. В. Систематизация способов выемки и переработки руд маломасштабных месторождений // Вестн. ЗабГУ. — 2020. — Т. 26. — № 5. — С. 13–20.
8. Абрамов А. А. Пути повышения комплексности использования руд цветных металлов на основе совершенствования технологий их обогащения // Недропользование XXI век. — 2007. — № 5. — С. 74–80.
9. Резниченко С. С., Антипова Н. М. Формирование качественно-количественных показателей рудопотоков при открытой разработке меднорудных месторождений // ГИАБ. — 2011. — № S 4–14. — С. 41–46.
10. Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Новые подходы к проектированию ресурсовоспроизводящих технологий комплексного освоения рудных месторождений // ФТПРПИ. — 2011. — № 3. — С. 58–66.

11. **Аристов И. И., Рубцов С. К.** Совершенствование методик нормирования и учета потерь и разубоживания руды при разработке сложноструктурных месторождений // Недропользование XXI век. — 2006. — № 1. — С. 28–36.
12. **Горлов Ю. В., Игнатов В. Н., Горлов Д. Ю., Шум И. Ю.** Оценка проектных эксплуатационных потерь твердых полезных ископаемых при буровзрывных работах // ГИАБ. — 2010. — № 2. — С. 80–82.
13. **Ракишев Б. Р.** Автоматизированное проектирование и производство массовых взрывов на карьерах. — Алматы: Гылың, 2016. — 340 с.
14. **Горлов Ю. В., Игнатов В. Н., Горлов Д. Ю., Шум И. Ю.** Методика расчета зоны переизмельчения горных пород вокруг скважинного заряда // ГИАБ. — 2010. — № 2. — С. 75–79.
15. **Хакулов В. А., Кононов О. В., Шаповалов В. А., Карпова Ж. В.** Совершенствование добычи и переработки руд Тырнаузского месторождения // Обогащение руд. — 2021. — № 3. — С. 3–8.
16. **Ревнивцев В. И., Азбель Е. И., Баранов Е. Г.** Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке. — М.: Недра, 1987. — 307 с.
17. **Sekisov A. and Rasskazova A.** Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu–Au porphyry deposit, Minerals, 2021, Vol. 11, No. 1. — P. 1–11.
18. **Бабич И. Н.** Новые возможности оценки контрастности руд в недрах // Рациональное освоение недр. — 2020. — № 6. — С. 38–46.
19. **Чебан А. Ю., Секисов Г. В.** Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2020. — Т. 18. — № 3. — С. 4–12.
20. **Шумилова Л. В., Резник Ю. Н., Трубачев А. И.** Переработка золотосодержащих руд методом кучного и кюветного выщелачивания: проблемы и перспективы развития. — Чита: ЧитГУ, 2009. — 388 с.
21. **Голик В. И., Исмаилов Т. Т., Мицик М. Ф.** Универсальная модель выщелачивания металлов из некондиционного сырья с механохимической активацией процессов извлечения // ГИАБ. — 2011. — № 10. — С. 233–241.
22. **Трубецкой К. Н., Чантурия В. А., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В.** Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья. — М.: Наука, 2010. — 270 с.
23. **Чебан А. Ю., Секисов А. Г.** Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2020. — Т. 18. — № 1. — С. 16–22.
24. **Голик В. И.** Технологии выщелачивания металлов — путь реанимации горного производства Осетии // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 273–282.
25. **Пат. 2647961 РФ.** Способ выщелачивания золота из упорных руд / А. Г. Секисов, А. В. Рассказова // Оpubл. в БИ. — 2018. — № 9.

Поступила в редакцию 08/IX 2021

После доработки 21/IX 2021

Принята к публикации 11/XI 2021