ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Полное извлечение кондиционных руд из сложноструктурных блоков за счет частичного примешивания некондиционных руд

Б.Р.Ракишев

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан

***Как цитировать эту статью*:** Ракишев Б.Р. Полное извлечение кондиционных руд из сложноструктурных блоков за счет частичного примешивания некондиционных руд // Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 919-930. EDN HNCZSX

Аннотация

Представлено горно-технологическое обоснование полного извлечения кондиционных руд из сложноструктурных блоков уступов путем примешивания слоя некондиционных руд определенных размеров. Актуальность работы состоит в разработке инновационных методов установления параметров некондиционного слоя руд, примешиваемого к кондиционным. Основной проблемой является обеспечение полного извлечения полезных компонентов в концентрат из отгруженной руды с допустимыми отклонениями от требуемых. Проведена новая типизация сложноструктурных рудных блоков уступа. Получены аналитические зависимости горно-геологических характеристик сложноструктурных рудных блоков. Выведены теоретические зависимости для определения основных показателей обогащения полезных ископаемых. Предложены аналитические зависимости для определения содержания полезного компонента в отгружаемой руде α' – смеси кондиционной руды с содержанием полезного компонента α и примешиваемого слоя некондиционной руды с содержанием полезного компонента α''. Впервые в горной науке обоснован новый подход полного извлечения кондиционных руд из сложноструктурных блоков уступов за счет прихвата определенной части некондиционных руд при выемке, повышающий объем извлекаемой руды и расширенное извлечение полезных компонентов в концентрат. Приращение полезных компонентов может достичь 10-15 % от общего объема добычи, что позволяет прогнозировать существенное повышение полноты извлечения полезных ископаемых из недр Земли.

Ключевые слова

сложноструктурные блоки уступов; типы блоков; горно-геологические характеристики; содержание полезных компонентов; примешиваемые слои некондиционных руд; полное извлечение кондиционных руд

Финансирование

Статья подготовлена в рамках проекта, финансируемого Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан № 2023/АР19676591 «Разработка инновационных технологий полного извлечения разрозненных кондиционных руд из сложноструктурных блоков уступов».

Поступила: 05.07.2023 ***Принята: 03.06.2024*** ***Онлайн: 03.10.2024*** ***Опубликована: 25.12.2024***

Введение.

Полное извлечение полезных ископаемых из недр, в том числе кондиционных руд, снижение их потерь и разубоживания при эксплуатации различных месторождений является одной из наиболее острых и актуальных задач горной науки и промышленности [1-3]. Проблема приобретает особую значимость при разработке сложноструктурных рудных месторождений [4-6], которые обычно представлены разнообразным сочетанием рудных тел и вмещающих пород (некондиционных руд) сложной конфигурации, различных размеров и физико-технических и геологических характеристик. Контакты между кондиционными и некондиционными рудами визуально неразличимы и носят вероятностный характер. Доля сложноструктурных блоков на предприятиях цветной металлургии стран СНГ составляет 60-90 %, а эксплуатационные потери руды при их разработке могут достигать 20-35 % [7-9].

Основными причинами высокого уровня потерь и разубоживания при открытой разработке сложноструктурных полезных ископаемых являются недостаточная изученность геолого-морфологического строения сложноструктурных блоков уступов; несоответствие применяемых технологий выемочно-погрузочных работ реальным горно-геологическим условиям залегания сложноструктурных полезных ископаемых в массиве и во взорванном состоянии; использование частных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Б.Р.Ракишев, 2024

методов определения и нормирования потерь и разубоживания, ориентированных на горно-геологические объекты с четкими геологическими границами – жилы, линзы, пласты и пластообразования залежи. Причем количественные и качественные потери полезных ископаемых в них обычно устанавливаются для приконтурных участков рудных блоков.

Большинство месторождений руд цветных, благородных и редких металлов Казахстана являются сложноструктурными. Рудные участки имеют сложное геолого-морфологическое строение, неравномерное оруднение, визуально неразличимые границы с вмещающими породами. Они характеризуются различными формой, размерами рудных тел, размещением в рассматриваемом пространстве, оруднением и физико-механическими свойствами пород [10-12]. Совокупность этих признаков и определяет степень сложности геолого-морфологического строения сложноструктурных участков полезных ископаемых. Разработка инновационных методов оценки сложности таких участков и их использование для существенного уменьшения потерь и разубоживания при разработке сложноструктурных полезных ископаемых является актуальной и приоритетной задачей горной науки и промышленности.

Целью исследования является горно-технологическое обоснование полного извлечения кондиционных руд из сложноструктурных блоков уступов с помощью примешивания слоя некондиционных руд установленных размеров. При этом обеспечивается извлечение полезных компонентов в концентрат с допустимыми отклонениями от требуемых.

Методы.

Для оценки геолого-морфологического строения сложноструктурных рудных блоков (ССРБ) уступа, ее использования в эффективной разработке этих блоков создаются их горно-геологические модели. Горно-геологическая модель содержит данные интервального опробования керна разведочных скважин по содержанию полезных компонентов и вредных примесей, информацию о глубинах скважин и геометрических параметрах разрозненных рудных тел. На основе этих данных с учетом требований, представляемых потребителем к товарной руде, устанавливаются границы между кондиционными и некондиционными рудами, выполняется оконтуривание рудных тел в рудном блоке уступа и осуществляется типизация ССРБ уступов.

Анализ литературных источников по моделированию [13-15] и типизации [16-18] сложноструктурных блоков [19-21], их теоретическое осмысление [22-24] показывают, что по характеру расположения рудных тел и их геометрическим параметрам сложноструктурные блоки уступов могут быть разделены лишь на два типа [10]. При этом в качестве определяющих признаков рассмотрены пространственное размещение фиксированных рудных тел в рудном блоке уступа и их разрозненность (разобщение рудных тел в блоке вмещающими породами – некондиционными рудами) [25-27].

За рудные тела приняты объемы кондиционных запасов руд, установленные путем анализа проб взрывных скважин и других геофизических методов. Они не всегда совпадают с балансовыми запасами руд, поскольку выявляются в результате доразведки. Кроме того, вмещающие породы, контактирующие с рудными телами, представляют собой некондиционные руды.

К первому типу ССРБ уступов отнесены блоки, сложенные из разрозненных сплошных рудных тел различных форм и размеров с прямолинейными контактами с породными прослоями (рис.1).

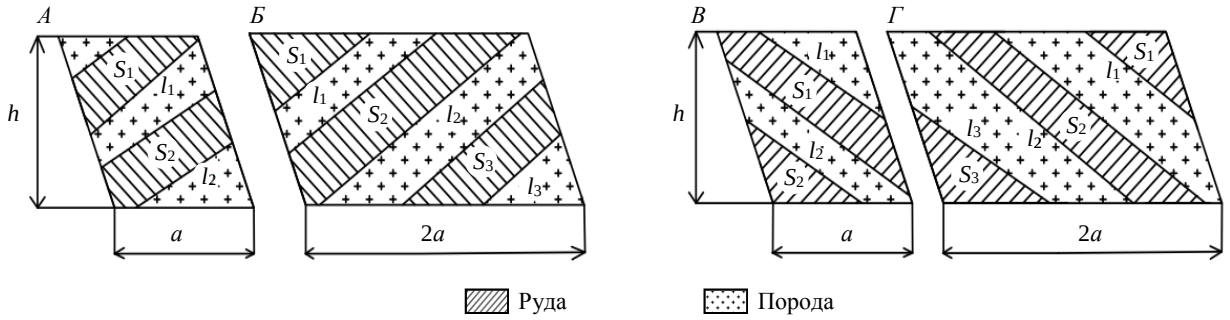


Рис.1. Виды сложноструктурных блоков уступов, сложенных из разрозненных сплошных рудных тел:
А, Б – угол падения тел от 0 до π/2; *В, Г* – угол падения тел от π/2 до π
h – высота блока; *a*, 2*a* – ширина блока; S_i – площадь сечения *i*-го рудного тела; l_i – длина контактных линий *i*-го рудного тела с вмещающими породами

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 919-930
© Б.Р.Ракишев, 2024

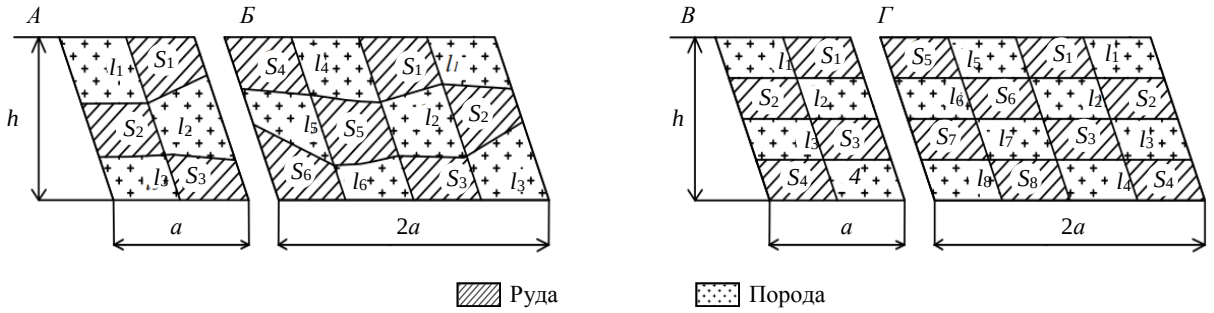


Рис.2. Виды сложноструктурных блоков, сложенных из рассредоточенных рудных тел:
А, *Б* – трапециевидные тела; *В*, *Г* – параллелограммные тела

При использовании программных продуктов Datamine, Surpac, Micromine и др. имеют место только прямолинейные контакты. Они простираются от одной границы блока (выемочной единицы) до другой и образуют с горизонтом углы, изменяющиеся от 0 до π.

Первый тип ССРБ уступов может быть представлен горизонтальными, наклонными или вертикальными пластообразными рудными телами относительно выдержанной мощности (контактные линии параллельны) или линзообразными включениями переменной мощности, между которыми размещаются прослои вмещающих пород (некондиционных руд).

Второй тип ССРБ уступов представлен блоками, сложенными из рассредоточенных рудных тел в виде геометрических фигур различных форм и размеров, например многоугольников с прямолинейными контактами с вмещающими породами (рис.2). Контактные линии располагаются внутри блока (выемочной единицы). Этот тип сложноструктурных блоков может состоять их гнездообразных рудных тел различной формы и размеров и т.д.

Приведенные типы ССРБ (рис.1, 2) служат базой для определения их технологических характеристик, аналитически взаимоувязывающих между собой все выявленные геометрические параметры геолого-морфологического строения блоков. Только в таком случае они будут объективно отражать естественное состояние изучаемого объекта и способствовать более полному извлечению полезных ископаемых из недр за счет назначения наиболее эффективных технологий буровзрывных и выемочно-погрузочных работ в условиях сложноструктурных блоков.

Обсуждение результатов.

Горно-геологические характеристики сложноструктруных рудных блоков уступа. В качестве искомых горно-геологических характеристик могут быть рассмотрены наиболее распространенные и сравнительно легко измеряемые величины – коэффициент рудонасыщенности блока и показатель сложности геологического строения блока.

Приведенные схемы размещения рудных тел сложноструктурных блоков (рис.1, 2) характеризуются уровнем насыщения их полезным ископаемым. Это свойство для рассматриваемого разреза блока может быть оценено коэффициентом рудонасыщенности блока

$$k_{\text{рн}} = \sum_{i=1}^{n} S_i \Big/ S_{\text{б}},$$

где $S_{\text{б}}$ – площадь рассматриваемого сечения сложноструктурного блока, м^2; n – число рудных тел.

Средний коэффициент рудонасыщенности для всего сложноструктурного блока определяется по следующей зависимости:

$$k_{\text{рн}}^{\text{ср}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \left(\sum_{i=1}^{n} S_i \Big/ S_{\text{б}} \right),$$

где m – число разрезов; j – индекс текущего разреза блока.

Число сечений зависит от протяженности сложноструктурного блока. Каждое сечение охватывает зону протяженностью, равной, как правило, расстоянию между скважинами в ряду.

При определении численных значений $k_{\text{рн}}$ необходимо учитывать, что при открытых горных работах с применением современной мобильной выемочно-погрузочной техники высота сложноструктурного добычного уступа обычно не превышает 10 м, а наименьшая ширина заходки по

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

целику составляет 8-10 м. При взрывном дроблении таких блоков выемка слоя полезного ископаемого мощностью ниже 2,5 м оказывается экономически невыгодной, а порой технически невозможной. Поэтому нижнее значение рассматриваемого показателя может быть принято равным 0,25, а верхнее – 0,75. Это означает, что в большинстве случаев коэффициент рудонасыщенности сложноструктурного блока лежит в пределах 0,25-0,75.

Сложноструктурные блоки по степени рудонасыщенности подразделяются на более рудонасыщенные ($k_{рн}$ = 0,75-0,6); умеренно рудонасыщенные ($k_{рн}$ = 0,6-0,4); менее рудонасыщенные ($k_{рн}$ = 0,4-0,25).

Чем менее рудонасыщен блок, тем сложнее его отработка без малых количественных и качественных потерь. Однако, как показывает опыт работы горнорудных предприятий, при одном и том же значении показателя рудонасыщенности достигаются различные конечные результаты по извлечению полезных ископаемых из разнообразных сложноструктурных блоков. Определяющими параметрами блока в этом случае выступают размеры площади отдельных рудных тел и линий их контактов с вмещающими породами (некондиционными рудами) в рассматриваемом объеме, соотношение которых характеризует степень сложности структуры ССРБ и вычисляется при помощи коэффициента сложности геолого-морфологического строения блока

$$k_{сл} = \sum_{i=1}^{n} l_i t' \Big/ \sum_{i=1}^{n} S_i , \qquad (1)$$

где t' – толщина слоя вмещающих пород (или руд), попадающих при экскавации в рудную массу (или в отгружаемую породу), м.

При исключении из зависимости (1) знаков суммы определяется коэффициент сложности строения i-го рудного тела в блоке.

Показатель сложности строения блока $k_{сл}$ выражает отношение суммарной площади приконтактного слоя примешиваемой породы или теряемой руды к суммарной площади рудных тел на данном разрезе. Иначе говоря, уравнение (1) определяет уровень количественных и качественных потерь руды при извлечении ее из ССРБ уступа в долях единицы. В зависимости от содержания числителя этот показатель представляет собой потери, разубоживание, либо и то, и другое. Чем меньше сумма площадей рудных тел, тем больше коэффициент сложности геолого-морфологического строения блока, и наоборот. Это обстоятельство достаточно полно отражает реальное состояние дел на горных предприятиях.

Если толщина приконтактного слоя примешиваемой породы или теряемой руды для всех рудных тел ССРБ является величиной постоянной, то ее можно вынести за знак суммы. Тогда количественные и качественные потери будут пропорциональны отношению сумм длин контактных линий к суммарной площади рудных тел на данном разрезе блока:

$$k_{сл} = \mu \left(\sum_{i=1}^{n} l_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} S_i \right),$$

где μ – некоторый коэффициент пропорциональности, μ = t' (м).

Как видно из уравнения (1), показатель сложности геологического строения рудных блоков зависит от толщины примешиваемого слоя породы или руды. Расчеты показывают, что для сложноструктурных месторождений рассматриваемый критерий при значении t', равном 0,25 м (десятой части наименьшей мощности рудного слоя), колеблется в пределах 0,1-0,3. Причем чем больше $k_{сл}$, тем сложнее структура блока и тем больше источник потерь. На основе этого положения сложноструктурные рудные блоки уступов по характеру геолого-морфологического строения можно подразделить на сложноструктурные ($k_{сл}$ = 0,1-0,2); более сложноструктурные ($k_{сл}$ = 0,2-0,3). При значении, превышающем 0,3, селективная выемка полезного ископаемого из ССРБ по экономическим соображениям становится весьма проблематичной, так как текущие затраты на добычу достигают невосполнимых размеров.

Анализ горно-геологических характеристик ССРБ. Результативность использования разработанной методики определения горно-геологических характеристик ССРБ представлена в табл.1 численными значениями. Высота блоков принята равной высоте уступа, т.е. h = 10 м, ширина

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

блоков a = 9, $2a$ = 18 м. Площади рудных тел S_i и длины контактных линий рудных тел с вмещающими породами (или некондиционными рудами) l_i принимались близкими к таковым на карьерах цветной металлургии стран СНГ.

Таблица 1

Горно-геологические характеристики ССРБ, сложенных из разрозненных сплошных рудных тел

А	*Б*	*В*	*Г*
$S_1(l_1)$ = 21,12 (13,25) $S_2(l_2)$ = 26,93 (15,94)	$S_1(l_1)$ = 17,69 (7,64) $S_2(l_2)$ = 50,09 (28,23) $S_3(l_3)$ = 29,35 (18,17)	$S_1(l_1)$ = 34,43 (23,89) $S_2(l_2)$ = 13,89 (8,92)	$S_1(l_1)$ = 13,23 (8,69) $S_2(l_2)$ = 44,29 (33,48) $S_3(l_3)$ = 19,34 (10,54)
$\Sigma S_i(\Sigma l_i)$ = 48,05 (29,19)	$\Sigma S_i(\Sigma l_i)$ = 97,13 (54,04)	$\Sigma S_i(\Sigma l_i)$ = 48,32 (32,81)	$\Sigma S_i(\Sigma l_i)$ = 76,86 (52,71)
$k_{сл}$ = 0,157; $k_{сл}$ = 0,148	$k_{сл}$ = 0,108; $k_{сл}$ = 0,141; $k_{сл}$ = 0,155	$k_{сл}$ = 0,173; $k_{сл}$ = 0,160	$k_{сл}$ = 0,164; $k_{сл}$ = 0,189; $k_{сл}$ = 0,136
$k_{рн}$ = 0,534; $k_{сл}$ = 0,152	$k_{рн}$ = 0,539; $k_{сл}$ = 0,139	$k_{рн}$ = 0,536; $k_{сл}$ = 0,169	$k_{рн}$ = 0,427; $k_{сл}$ = 0,171

Таблица 2

Горно-геологические характеристики ССРБ, сложенных из рассредоточенных рудных тел

А	*Б*	*В*	*Г*
$S_1(l_1)$ = 14,59 (8,58)	$S_1(l_1)$ = 15,52 (11,5) $S_2(l_2)$ = 14,50 (13,58)	$S_1(l_1)$ = 11,25 (7,16)	$S_1(l_1)$ = 11,25 (9,82) $S_2(l_2)$ = 11,25 (11,66)
$S_2(l_2)$ = 14,41 (12,20)	$S_3(l_3)$ = 12,01 (10,3) $S_4(l_4)$ = 14,95 (8,39)	$S_2(l_2)$ = 11,25 (11,66)	$S_3(l_3)$ = 11,25 (14,32) $S_4(l_4)$ = 11,25(7,16)
$S_3(l_3)$ = 12,08 (7,64)	$S_5(l_5)$ = 17,25 (16,95) $S_6(l_6)$ = 15,10 (8,19)	$S_3(l_3)$ = 11,25 (11,66)	$S_5(l_5)$ = 11,25 (7,16) $S_6(l_6)$ = 11,25 (14,32)
		$S_4(l_4)$ = 11,25 (7,16)	$S_7(l_7)$ = 11,25 (11,66) $S_8(l_8)$ = 11,25 (9,82)
$\Sigma S_i(\Sigma l_i)$ = 41,08 (28,42)	$\Sigma S_i(\Sigma l_i)$ = 89,33(68,91)	$\Sigma S_i(\Sigma l_i)$ = 45 (37,64)	$\Sigma S_i(\Sigma l_i)$ = 90 (85,92)
$k_{сл}$ = 0,147; $k_{сл}$ = 0,212 $k_{сл}$ = 0,158	$k_{сл}$ = 0,185; $k_{сл}$ = 0,235 $k_{сл}$ = 0,215; $k_{сл}$ = 0,14 $k_{сл}$ = 0,245; $k_{сл}$ = 0,135	$k_{сл}$ = 0,159; $k_{сл}$ = 0,260 $k_{сл}$ = 0,260; $k_{сл}$ = 0,159	$k_{сл}$ = 0,218; $k_{сл}$ = 0,259 $k_{сл}$ = 0,318; $k_{сл}$ = 0,159 $k_{сл}$ = 0,159; $k_{сл}$ = 0,318 $k_{сл}$ = 0,259; $k_{сл}$ = 0,218
$k_{рн}$ = 0,456; $k_{сл}$ = 0,173	$k_{рн}$ = 0,496; $k_{сл}$ = 0,193	$k_{рн}$ = 0,500; $k_{сл}$ = 0,209	$k_{рн}$ = 0,500; $k_{сл}$ = 0,238

Представлены значения коэффициентов сложности строения отдельных рудных тел и блоков для вариантов *А, Б, В, Г*, содержащих рудные тела различных конфигураций, размеров и разнообразного взаимного расположения (рис.1, 2).

Анализ данных табл.1, 2 показывает, что оба рудных блока являются умеренно рудонасыщенными ($k_{рн}$ = 0,427-0,539) и сложноструктурными ($k_{сл}$ = 0,139-0,193). Исключение составляют ССРБ, сложенные из рассредоточенных рудных тел (*В*, *Г*), для которых $k_{сл}$ = 0,209-0,238. Следовательно, эти блоки более сложноструктурны. Блоки второго типа имеют относительно большее значение ($k_{сл}$ = 0,173-0,238), чем блоки первого типа ($k_{сл}$ = 0,139-0,171). Это предопределяет более высокий уровень количественных и качественных потерь полезного ископаемого в блоках второго типа, что является вполне естественным.

Наибольшее значение $k_{сл}$ имеют рудные тела S_2, S_3 ($k_{сл}$ = 0,260) блока *В* и рудные тела S_3, S_6 ($k_{сл}$ = 0,318) блока *Г* второго типа ССРБ, т.е. при извлечении этих рудных тел количественные и качественные потери составляют 26,0 и 31,8 % соответственно.

Аналитическое определение основных показателей обогащения полезных ископаемых. Для горно-технологического обоснования полного извлечения руд из сложноструктурных блоков без потерь и разубоживания необходимо рассмотреть основные показатели процесса обогащения руд. Содержание полезного компонента в концентрате β – это отношение массы полезного компонента $M_{пк}$ к массе концентрата $M_к$, а содержание полезного компонента в хвостах обогащения δ представляет собой отношение массы полезного компонента в хвостах $M_{пх}$ к массе хвостов $M_х$:

$$\beta = M_{пк}/M_к\ ;\ \delta = M_{пх}/M_х\ .$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Численные значения β и δ устанавливаются в результате химического анализа.

Выход концентрата $\gamma_к$ вычисляется как отношение массы концентрата $M_к$ к массе исходного сырья $M_р$, а выход хвостов $\gamma_х$ – отношение их массы $M_х$ к массе исходного сырья $M_р$:

$$\gamma_к = M_к / M_р;\ \gamma_х = M_х / M_р.$$

Извлечение полезного компонента в концентрат $\varepsilon_к$ и извлечение полезного компонента в хвосты $\varepsilon_х$ рассчитываются следующим образом:

$$\varepsilon_к = M_{пк} / M_р\,\alpha = M_к\beta / M_р\,\alpha;\ \varepsilon_х = M_{пх} / M_р\,\alpha = M_к\delta / M_р\,\alpha.$$

Указанные показатели обогащения обычно устанавливаются путем непосредственных измерений и вычислений [9, 28, 29]. Для их теоретического определения необходимо составить уравнение баланса массы руды, поступившей на фабрику, и продуктов обогащения, а также уравнение баланса полезных компонентов в руде, концентрате и хвостах:

$$M_р = M_к + M_х;\ M_р\alpha = M_{пк} + M_{пх} = M_к\beta + M_х\delta. \quad (2)$$

При совместном решении уравнений (2) можно получить следующие соотношения:

• для выхода концентрата

$$\gamma_к = \frac{M_к}{M_р} = \frac{\alpha - \delta}{\beta - \delta}; \quad (3)$$

• для выхода хвостов

$$\gamma_х = \frac{M_х}{M_р} = \frac{\beta - \alpha}{\beta - \delta}; \quad (4)$$

• для извлечения полезного компонента в концентрат

$$\varepsilon_к = \frac{M_к\beta}{M_р\alpha} = \frac{\alpha - \delta}{\beta - \delta}\frac{\beta}{\alpha}; \quad (5)$$

• для извлечения полезного компонента в хвосты

$$\varepsilon_х = \frac{M_х\delta}{M_р\alpha} = \frac{\beta - \alpha}{\beta - \delta}\frac{\delta}{\alpha}; \quad (6)$$

Как видно, при известных величинах α, β, δ по формулам (3)-(6) легко вычисляются основные показатели, характеризующие процесс обогащения полезных ископаемых.

Поскольку массы руды, концентрата и хвостов можно измерить, то извлечение и выходы продуктов обогащения тоже можно считать известными, поскольку они рассчитываются по формулам (3)-(6).

Извлечение полезного компонента в продукты обогащения и его выходы взаимоувязываются следующими соотношениями:

$$\varepsilon_к = \gamma_к\frac{\beta}{\alpha};\ \varepsilon_х = \gamma_х\frac{\delta}{\alpha}.$$

Из формул (3)-(6) следует

$$\gamma_к + \gamma_х = 1;\ \varepsilon_к + \varepsilon_х = 1.$$

Эти результаты вполне естественны и подтверждают справедливость выражений (3)-(6). Аналитические зависимости (3)-(6) для определения основных показателей обогащения по форме незначительно отличаются от известных [30-32]. Однако они получены путем совместного решения уравнений баланса массы рудного сырья и баланса полезных компонентов при их переработке,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

а также четко аргументированы, что устраняет шероховатости, присущие известным формулам. Из зависимостей следует, что при идеальной технологии обогащения минерального сырья полезные компоненты в хвостах должны отсутствовать, поэтому $\varepsilon_к = 1$, а выход концентрата (3) равняется отношению содержания полезного компонента в исходной сырье к таковому же в концентрате. Чем больше металла в концентрате, тем меньше выход концентрата, эти выводы подтверждаются практикой горно-обогатительных предприятий.

Выводы также подтверждаются показателями обогащения самых распространенных медных, свинцовых и цинковых руд с содержанием полезного компонента в сырье $\alpha_{Cu} = 0{,}40\text{-}1{,}0$, $\alpha_{Pb} = 0{,}8\text{-}3{,}0$, $\alpha_{Zn} = 1{,}0\text{-}5{,}5$ %; в концентрате $\beta_{Cu} = 20{,}0$, $\beta_{Pb} = 45{,}0$, $\beta_{Zn} = 40{,}0$ %, в хвостах $\delta_{Cu} = 0{,}06$, $\delta_{Pb} = 0{,}07$, $\delta_{Zn} = 0{,}08$ %. Результаты расчетов приведены в табл.3 и рис.3. С увеличением содержания полезного компонента в руде улучшаются показатели их обогащения, что и имеет место в реальной жизни. Используя уравнения (3)-(6), можно прогнозировать интересующие показатели обогащения полезных ископаемых при различных значениях α, β и δ.

Таблица 3

Показатели обогащения руд при различном содержании полезного компонента в руде

Медная руда, %					Свинцовая руда, %					Цинковая руда, %				
α	$\varepsilon_к$	$\gamma_к$	$\varepsilon_х$	$\gamma_х$	α	$\varepsilon_к$	$\gamma_к$	$\varepsilon_х$	$\gamma_х$	α	$\varepsilon_к$	$\gamma_к$	$\varepsilon_х$	$\gamma_х$
0,40	85,26	1,71	14,74	98,29	0,80	91,39	1,62	8,61	98,38	1,00	92,18	2,30	7,82	97,70
0,45	86,93	1,96	13,07	98,04	1,00	93,14	2,07	6,86	97,93	1,40	94,47	3,31	5,53	96,69
0,50	88,26	2,21	11,74	97,79	1,20	94,31	2,52	5,69	97,48	1,80	95,75	4,31	4,25	95,69
0,55	89,36	2,46	10,64	97,54	1,40	95,15	2,96	4,85	97,04	2,20	96,56	5,31	3,44	94,69
0,60	90,27	2,71	9,73	97,29	1,60	95,77	3,41	4,23	96,59	2,60	97,12	6,31	2,88	93,69
0,65	91,04	2,96	8,96	97,04	1,80	96,26	3,85	3,74	96,15	3,00	97,53	7,31	2,47	92,69
0,70	91,70	3,21	8,30	96,79	2,00	96,65	4,30	3,35	95,70	3,40	97,84	8,32	2,16	91,68
0,75	92,28	3,46	7,72	96,54	2,20	96,97	4,74	3,03	95,26	3,80	98,09	9,32	1,91	90,68
0,80	92,78	3,71	7,22	96,29	2,40	97,23	5,19	2,77	94,81	4,20	98,29	10,32	1,71	89,68
0,85	93,22	3,96	6,78	96,04	2,60	97,46	5,63	2,54	94,37	4,60	98,46	11,32	1,54	88,68
0,90	93,61	4,21	6,39	95,79	2,80	97,65	6,08	2,35	93,92	5,00	98,60	12,32	1,40	87,68
0,95	93,97	4,46	6,03	95,54	3,00	97,82	6,52	2,18	93,48	5,40	98,72	13,33	1,28	86,67
1,00	94,28	4,71	5,72	95,29						5,50	98,74	13,58	1,26	86,42

Обоснование полного извлечения руд из сложноструктурных блоков уступов. Для решения поставленной задачи необходимо обратить внимание на принципы оконтуривания кондиционных руд, которое осуществляется на основе принятого по технологическим и экономическим мотивам предельно допустимого минимального значения полезных компонентов в руде – α.

Объемы руды с содержанием полезного компонента ниже указанного уровня (< α) считаются некондиционными и включаются в состав вмещающих горных пород. В то же время из геологии месторождений, в частности руд цветных, благородных и редких металлов [33-35], известно, что снижение содержания полезного компонента с удалением от центра рудного тела происходит постепенно. Это значит, что содержание полезного компонента некондиционных руд, непосредственно контактирующих с кондиционными рудами, незначительно отличается от нормативного. Однако с увеличением указанного объема уменьшается содержание полезного компонента в общей отгружаемой руде. Содержание полезного компонента в такой рудной массе в 3D-формате определяется по формуле:

$$\alpha' = \frac{V_{кр} + \lambda V_{нр}}{V_{кр} + V_{нр}} \alpha, \qquad (7)$$

где $V_{кр}$ – объем кондиционной руды, м^3; $V_{нр}$ – объем примешиваемого слоя некондиционной руды, м^3; λ – относительное содержание полезного компонента в примешиваемом объеме некондиционных руд, при расстоянии от контура рудного тела, равном 0,25; 0,4; 0,5 м; λ составляет 0,75; 0,6; 0,5 соответственно.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

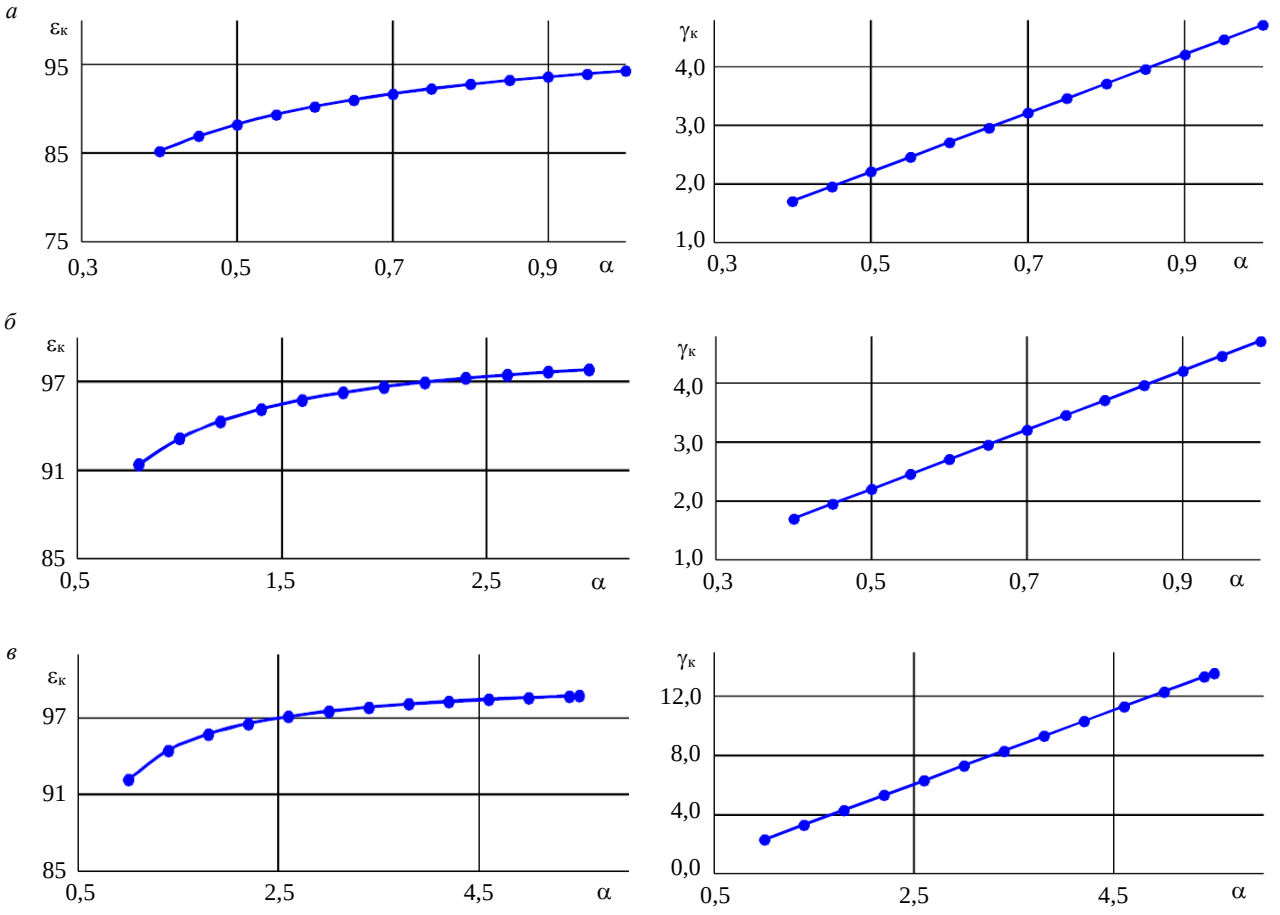


Рис.3. Графики изменения показателей обогащения ($\varepsilon_к$, $\gamma_к$) медной (*а*), свинцовой (*б*) и цинковой (*в*) руд в зависимости от содержания полезного компонента в руде

При заданных значениях площадей рудных тел, длин их контактных линий с некондиционными рудами (см. рис.1, 2) содержание полезного компонента в отгружаемой руде в 2D-формате вычисляется по следующей зависимости:

$$\alpha' = \frac{S_i + \lambda l_i t'}{S_i + l_i}\alpha, \tag{8}$$

где t' – толщина примешиваемых слоев некондиционных руд.

Обычно минимальная мощность (толщина) t отрабатываемого слоя руды сложноструктурных блоков на карьерах цветной металлургии стран СНГ составляет 2,5 м (рис.4). Площадь извлекаемого рудного тела на единицу толщины рудного блока на данном сечении составляет tl, площади примешиваемых слоев некондиционных руд – $2t'l$, а площадь всей отгружаемой руды $(t + 2t')l$. Содержание полезного компонента в отгружаемой руде в линейном формате определяется при помощи выражения

$$\alpha' = \frac{t + 2\lambda t'}{t + 2t'}\alpha. \tag{9}$$

Как видно из уравнений (7)-(9), содержание полезного компонента в отгружаемой руде из сложноструктурных блоков очень зависит от закономерностей убывания содержания полезного компонента в руде по мере удаления от центра рудного тела и размеров примешиваемых зон некондиционных руд. С учетом сочетания этих параметров можно установить их наивыгоднейшие значения для полной отработки установленных запасов полезных ископаемых без потерь и разубоживания.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 919-930
© Б.Р.Ракишев, 2024

В общем случае объемы кондиционных и примешиваемых к ним некондиционных руд на данном сечении сложноструктурных блоков (см. рис.1, 2) определяются по следующим формулам:

$$V_{кр} = \sum_{i=1}^{n} S_i z_i, \; V_{нр} = \sum_{i=1}^{n} l_i t_i z_i,$$

где z_i – глубина выемки кондиционных и некондиционных руд выемочно-погрузочным оборудованием, м; t_i – толщина примешиваемых некондиционных руд, м.

Приемлемым (рациональным) считается объем некондиционных руд, обеспечивающий требуемое содержание полезного компонента в отгружаемой руде в соответствии с выражениями (7)-(9).

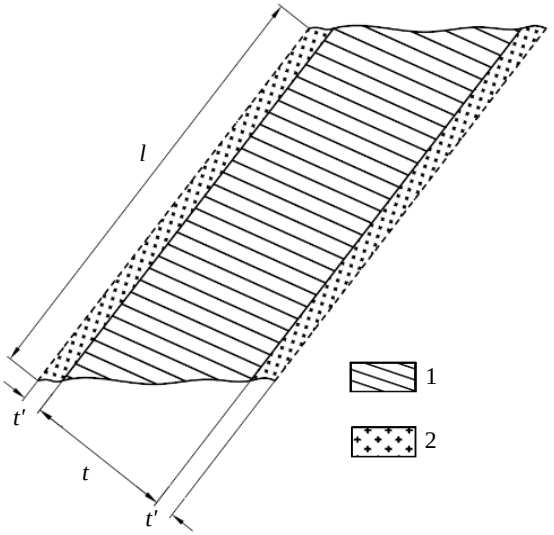


Рис.4. Схема к определению содержания полезного компонента в отгружаемой руде

1 – кондиционная руда; 2 – некондиционная руда

Тестирование методики определения содержания меди в отгружаемой руде из сложноструктурных блоков проводилось в условиях Актогайского месторождения медных руд, отрабатываемого 10-метровыми уступами. Минимальная мощность отрабатываемого рудного слоя 2,5 м. Производительность карьера по руде составляет 24,3 млн т/год, содержание меди в руде в настоящее время – 0,56 %, установленное бортовое содержание – 0,45 %, содержание меди в концентрате – 20 %, в хвостах – 0,06 %, извлечение в концентрат – 86 %.

Рассмотрено три варианта полного извлечения кондиционных запасов полезных ископаемых совместно с некоторой частью некондиционных руд сложноструктурных блоков при минимальной мощности рудного тела 2,5 м. Другие значения переменных: вариант 1 $t' = 0{,}25$ м, $\lambda = 0{,}75$; вариант 2 $t' = 0{,}4$, $\lambda = 0{,}6$; вариант 3 $t' = 0{,}5$, $\lambda = 0{,}5$. Содержание полезных компонентов в отгружаемой руде и извлечения их в концентрат для медных, свинцовых и цинковых руд приведены в табл.4.

Таблица 4

Содержание полезного компонента в отгружаемой руде и их извлечение в концентрат при различных размерах примешиваемых слоев некондиционных руд, %

Металл	Варианты							
	Исходный		1		2		3	
	α	$\varepsilon_к$	α	$\varepsilon_к$	α	$\varepsilon_к$	α	$\varepsilon_к$
Медь	0,45	86,93	0,43	86,35	0,41	85,49	0,39	84,70
	0,60	90,27	0,58	89,83	0,54	89,19	0,51	88,60
	0,75	92,28	0,72	91,93	0,68	91,42	0,64	90,94
	0,95	93,97	0,91	93,69	0,86	93,29	0,81	92,91
Свинец	1,00	93,14	0,96	92,84	0,90	92,39	0,86	91,98
	1,60	95,77	1,53	95,58	1,44	95,30	1,37	95,04
	2,20	96,97	2,11	96,83	1,99	96,63	1,89	96,44
	2,80	97,65	2,68	97,54	2,53	97,38	2,40	97,23
Цинк	1,40	94,47	1,34	94,23	1,26	93,86	1,20	93,52
	2,60	97,12	2,49	96,98	2,35	96,79	2,23	96,60
	4,20	98,29	4,03	98,21	3,79	98,09	3,60	97,97
	5,40	98,72	5,18	98,65	4,88	98,56	4,63	98,47

Содержание полезного компонента в отгружаемой медной руде с увеличением его содержания в кондиционной руде во всех вариантах увеличивается и уменьшается с удалением от контура рудного тела (табл.4). Аналогичная тенденция характерна и для извлечения меди в концентрат.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Однако эти изменения несущественны. Для оценки их влияния на конечный результат – извлечение полезного компонента в концентрат – необходимо рассмотреть отклонения показателей в рассматриваемых случаях.

Абсолютные и относительные отклонения этих показателей представлены в табл.5. Относительное отклонение содержания полезного компонента в отгружаемой руде в зависимости от его содержания в кондиционной руде во всех вариантах остается на одном уровне – 4,17; 9,7; 14,29 %. Относительное отклонение извлечения полезного компонента в концентрат в первом варианте изменяется от 0,67 до 0,29 %, во втором – от 1,65 до 0,72 %, в третьем – от 2,56 до 1,1 %. Эти показатели с изменением параметров примешиваемых слоев некондиционных руд в зависимости от содержания полезного компонента в кондиционной руде свидетельствуют о том, что относительное отклонение извлечения полезного компонента в концентрат от требуемого незначительно и лежит в допустимых пределах. Это означает, что при полном извлечении кондиционных руд из сложноструктурных блоков уступов путем примешивания слоя некондиционных руд определенных размеров обеспечивается требуемое качество отгружаемой рудной массы и увеличивание ее объема.

Таким образом, при новом подходе к разработке сложноструктурных блоков предполагаемая разубоживающая часть некондиционных руд переходит в категорию извлекаемых запасов. Вследствие этого увеличиваются как объем извлекаемой руды, так и расширенное извлечение полезных компонентов в концентрат. Такое приращение полезных компонентов может достичь 10-15 % от общего объема добычи.

Таблица 5

Отклонения исследуемых показателей от кондиционных при различных размерах примешиваемых слоев некондиционных руд, %

Металл	Варианты					
	1		2		3	
	$\Delta\alpha'$	$\Delta\varepsilon_к$	$\Delta\alpha'$	$\Delta\varepsilon_к$	$\Delta\alpha'$	$\Delta\varepsilon_к$
Медь	0,02 4,17	0,58 0,67	0,04 9,70	1,44 1,65	0,06 14,29	2,23 2,56
	0,03 4,17	0,44 0,48	0,06 9,70	1,08 1,19	0,09 14,29	1,67 1,85
	0,03 4,17	0,35 0,38	0,07 9,70	0,86 0,93	0,11 14,29	1,34 1,45
	0,04 4,17	0,28 0,29	0,09 9,70	0,68 0,72	0,14 14,29	1,06 1,12
Свинец	0,04 4,17	0,30 0,33	0,10 9,70	0,75 0,81	0,14 14,29	1,17 1,25
	0,07 4,17	0,19 0,20	0,16 9,70	0,47 0,49	0,23 14,29	0,73 0,76
	0,09 4,17	0,14 0,14	0,21 9,70	0,34 0,35	0,31 14,29	0,53 0,55
	0,12 4,17	0,11 0,11	0,27 9,70	0,27 0,28	0,40 14,29	0,42 0,43
Цинк	0,06 4,17	0,25 0,26	0,14 9,70	0,61 0,65	0,20 14,29	0,95 1,01
	0,11 4,17	0,13 0,14	0,25 9,70	0,33 0,34	0,37 14,29	0,51 0,53
	0,18 4,17	0,08 0,08	0,41 9,70	0,20 0,21	0,60 14,29	0,32 0,32
	0,23 4,17	0,06 0,07	0,52 9,70	0,16 0,16	0,77 14,29	0,25 0,25

Примечание. В числителе дроби приведены абсолютные, а в знаменателе – относительные отклонения.

Если годовая производительность ГОК по медной руде составляет 10 млн т, а сокращение эксплуатационных потерь всего 5 %, то приращение извлеченной руды достигнет 500 тыс. т. При содержании меди в руде 0,45 % стоимостью 6500 дол./т, экономический эффект составит 14625 тыс. дол.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Заключение.

В результате проведенных исследований проведена новая типизация сложноструктурных рудных блоков уступа. К первому типу отнесены блоки, сложенные из разрозненных сплошных рудных тел различных форм и размеров с прямолинейными контактами с породными прослоями. Второй тип уступов представлен блоками, сложенными из рассредоточенных рудных тел в виде многоугольников с прямолинейными контактами с вмещающими породами.

В качестве искомых горно-геологических характеристик сложноструктурных рудных блоков рассмотрены коэффициент рудонасыщенности блока и показатель сложности геологического строения блока, представлены аналитические зависимости этих характеристик.

Анализ численных значений характеристик показал, что оба рудных блока являются умеренно рудонасыщенными ($k_{рн}$ = 0,427-0,539) и сложноструктурными ($k_{сл}$ = 0,139-0,193). Исключение составляют варианты *В* и *Г* сложноструктурных блоков, сложенных из рассредоточенных рудных тел. Они являются более сложноструктурными.

Выведены теоретические зависимости для определения основных показателей обогащения полезных ископаемых. Они получены путем решения уравнений баланса массы рудного сырья и баланса полезных компонентов при их переработке.

Для обоснования полного извлечения руд из сложноструктурных блоков уступов предложены аналитические зависимости определения содержания полезного компонента в отгружаемой руде α', представляющей собой смесь кондиционной руды с содержанием полезного компонента α и примешиваемого слоя некондиционной руды с содержанием полезного компонента α".

По значениям содержания полезного компонента в отгружаемой руде определены относительные отклонения его извлечения в концентрат при различных вариантах изменения параметров примешиваемого слоя некондиционных руд в зависимости от содержания полезного компонента в кондиционной руде. Они незначительны и лежат в допустимых пределах.

При новом подходе к разработке сложноструктурных блоков предполагаемая разубоживающая часть некондиционных руд переходит в категорию извлекаемых запасов. Увеличивается как объем извлекаемой руды, так и расширенное извлечение полезных компонентов в концентрат. Приращение полезных компонентов может достичь 10-15 % от общего объема добычи, тем самым создаются предпосылки для существенного повышения полноты извлечения полезных ископаемых из недр.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шабаров А.Н., Куранов А.Д.* Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горно-технических условиях ведения горных работ // Горный журнал. 2023. № 5. С. 5-10. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.01

2. *Трубецкой К.Н., Пешков А.А., Мацко Н.А.* Определение области применения способов разработки крутопадающих залежей с использованием заранее сформированного выработанного пространства карьера // Горный журнал. 1994. № 1. С. 51-59.

3. *Трушко В.Л., Протосеня А.Г.* Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 162. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162

4. *Яковлев В.Л.* Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2018. 360 с.

5. *Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С.* Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 1. С. 63-73. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-63-73

6. *Чебан А.Ю., Секисов Г.В.* Сложноструктурные рудные блоки и их систематизация // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26. № 6. С. 43-53. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-6-43-53

7. *Лобынцев А.К., Фомин С.И.* Оценка степени влияния горнотехнических факторов на норматив готовых к выемке запасов при проектировании открытой разработки сложноструктурных рудных месторождений // Рациональное освоение недр. 2021. № 5. С. 40-43. DOI: 10.26121/RON.2021.52.15.004

8. *Кушнарев П.И.* Скрытые потери и разубоживание // Золото и технологии. 2017. № 3 (37). С. 82-87.

9. *Ракишев Б.Р.* Технологические ресурсы повышения качества и полноты использования минерального сырья // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2017. Т. 2. № 422. С. 116-124 (in English).

10. *Ракишев Б.Р.* Отработка медных руд Бозшакольского и Актогайского месторождений Казахстана // Горный журнал. 2019. № 1. С. 89-93. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.18

11. *Tolovkhan B., Demin V., Amanzholov Zh. et al.* Substantiating the rock mass control parameters based on the geomechanical model of the Severny Katpar deposit, Kazakhstan // Mining of Mineral Deposits. 2022. Vol. 16. Iss. 3. P. 123-133. DOI: 10.33271/mining16.03.123

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

12. *Suiekpayev Y.S., Sapargaliyev Y.M., Dolgopolova A.V. et al.* Mineralogy, geochemistry and U-Pb zircon age of the Karaotkel Ti-Zr placer deposit, Eastern Kazakhstan and its genetic link to the Karaotkel-Preobrazhenka intrusion // Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 131. № 104015. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104015

13. *Wellmann F., Caumon G.* Chapter One – 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties // Advances in Geophysics. Elsevier. 2018. Vol. 59. P. 1-121. DOI: 10.1016/bs.agph.2018.09.001

14. *Dagasan Y., Renard P., Straubhaar J. et al.* Pilot Point Optimization of Mining Boundaries for Lateritic Metal Deposits: Finding the Trade-off Between Dilution and Ore Loss // Natural Resources Research. 2019. Vol. 28. Iss. 1. P. 153-171. DOI: 10.1007/s11053-018-9380-9

15. *Masoumi I., Kamali G., Asghari O., Emery X.* Assessing the Impact of Geologic Contact Dilution in Ore/Waste Classification in the Gol-Gohar Iron Ore Mine, Southeastern Iran // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 4. № 336. DOI: 10.3390/min10040336

16. *Vasiukhina D.* 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Galeshchynske iron ore deposit, Ukraine // Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, 11-14 May 2020, Kyiv, Ukraine. European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. Vol. 2020. 5 p. DOI: 10.3997/2214-4609.2020geo067

17. *Remezova O.O., Khrushchov D.P., Vasylenko S.P., Yaremenko O.V.* Innovative approaches to information modeling of placer deposits // Geoinformatics, 11-14 May 2021. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. Vol. 2021. 6 p. DOI: 10.3997/2214-4609.20215521100

18. *Bala G., Kurylo M., Virshylo I.* Modeling and Estimation of Iron Ore Reserves in the Leapfrog on the Example of the Azovsky Block Deposit // 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine. European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. Vol. 2022. 5 p. DOI: 10.3997/2214-4609.2022580256

19. *Zeqiri R.* Nickel discretization and quality review in Gllavica mine, Kosovo // Mining of Mineral Deposits. 2021. Vol. 15. Iss. 1. P. 35-41. DOI: 10.33271/mining15.01.035

20. *Morales N., Seguel S., Cáceres A. et al.* Incorporation of Geometallurgical Attributes and Geological Uncertainty into Long-Term Open-Pit Mine Planning // Minerals. 2019. Vol. 9. Iss. 2. № 108. DOI: 10.3390/min9020108

21. *Osterholt V., Dimitrakopoulos R.* Simulation of Orebody Geology with Multiple-Point Geostatistics – Application at Yandi Channel Iron Ore Deposit, WA, and Implications for Resource Uncertainty / Advances in Applied Strategic Mine Planning. Cham: Springer, 2018. P. 335-352. DOI: 10.1007/978-3-319-69320-0_22

22. *Cowan E.J.* Deposit-scale structural architecture of the Sigma-Lamaque gold deposit, Canada – insights from a newly proposed 3D method for assessing structural controls from drill hole data // Mineralium Deposita. 2020. Vol. 55. Iss. 2. P. 217-240. DOI: 10.1007/s00126-019-00949-6

23. *Xing Jin, Gongwen Wang, Ping Tang et al.* 3D geological modelling and uncertainty analysis for 3D targeting in Shanggong gold deposit (China) // Journal of Geochemical Exploration. 2020. Vol. 210. № 106442. DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.106442

24. *Renguang Zuo, Kreuzer O.P., Jian Wang et al.* Uncertainties in GIS-Based Mineral Prospectivity Mapping: Key Types, Potential Impacts and Possible Solutions // Natural Resources Research. 2021. Vol. 30. Iss. 5. P. 3059-3079. DOI: 10.1007/s11053-021-09871-z

25. *Dowd P.A., Dare-Bryan P.C.* Planning, Planning, Designing and Optimising Production Using Geostatistical Simulation / Advances in Applied Strategic Mine Planning. Cham: Springer, 2018. P. 421-449. DOI: 10.1007/978-3-319-69320-0_26

26. *Rakishev B., Rakisheva Z., Auezova A., Orynbay A.* Automated determination of rock crushing zones in the collapse // Mining of Mineral Deposits. 2022. Vol. 16. Iss. 3. P. 109-114. DOI: 10.33271/mining16.03.109

27. *Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V., Shishkin A.S.* Break line and shotpile surfaces modeling in design of large-scale blasts / Mining goes Digital: Proceedings of the 39th International Symposium «Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry», 4-6 June 2019, Wroclaw, Poland. London: CRC Press, 2019. P. 279-285. DOI: 10.1201/9780429320774

28. *Пелих В.В., Салов В.М., Бурдонов А.Е., Лукьянов Н.Д.* Модель извлечения бадделеита из отвальных продуктов апатито-бадделеитовой обогатительной фабрики на концентраторе CVD6 // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 281-289. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.12

29. *Муталова М.А., Хакимова Д.Ю.* Исследование извлечения полезных компонентов из шлаков методом флотации // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. 2020. Т. 1. № 2. С. 26-30. DOI: 10.24412/2181-144X-2020-2-26-30

30. *Опалев А.С., Алексеева С.А.* Методическое обоснование выбора оптимальных режимов работы оборудования схемы стадиального вывода концентрата при обогащении железных руд // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 593-602. DOI: 10.31897/PMI.2022.80

31. *Пелевин А.Е.* Использование результатов фазового состава магнетитовой руды для прогнозирования выхода концентрата // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5-1. С. 131-144. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_131

32. *Голик В.И., Разоренов Ю.И., Бригида В.С., Бурдзиева О.Г.* Механохимическая технология добычи металлов из хвостов обогащения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 6. С. 175-183. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2687

33. *Овсейчук В.А.* Типизация рудных образований урановых месторождений Стрельцовского типа // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27. № 8. С. 35-47. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-35-47

34. *Туртыгина Н.А., Охрименко А.В.* Количественная оценка природной изменчивости качества медистых руд, залегающих в кровле интрузива // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. С. 146-156. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-146-156

35. *Заскинд Е.С., Конкина О.М.* Типизация сульфидных медно-никелевых и платинометалльных месторождений для целей прогноза и поисков // Отечественная геология. 2019. № 2. С. 3-15. DOI: 10.24411/0869-7175-2019-10010

Автор **Б.Р.Ракишев,** *д-р техн. наук, академик НАН РК, профессор, b.rakishev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5445-070X* (*Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан*).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0