УДК 622.27.013 DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-38-47

Разработка технологических схем вскрытия законтурных запасов руды при переходе на открыто-подземный способ разработки месторождения

Бурмистров К. В.[1], Багдасарян М. А.[1]*
[1] Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия
e-mail: margarbagdasaryan@mail.ru

Реферат

Введение. *Вскрытие запасов за проектными контурами карьеров преимущественно осуществляется на стадии подземной разработки выработками, пройденными из подземного рудника или из карьера. Однако в условиях, когда применение подземных работ нецелесообразно из-за особенностей залегания рудных тел относительно сформированного борта карьера, а открытая геотехнология становится неприменимой в связи с факторами, препятствующими разносу бортов, возникает сложная задача по разработке новых технологических схем вскрытия таких запасов.*

Целью работы *является разработка технологических схем вскрытия прибортовых и подкарьерных запасов путем увеличения уклона и уменьшения ширины карьерных автодорог, а также перехода на вскрытие подземными автомобильными съездами.*

Методология. *Исследование проведено на примере железорудного месторождения с использованием моделирования вариантов схем вскрытия с соответствующим изменением контуров карьера на глубоких горизонтах. На основе проведенного горно-геометрического анализа дана количественная оценка законтурным запасам, подлежащим отработке. Методом сравнения технико-экономических показателей установлены преимущества и недостатки всех разработанных технологических решений, рассчитана устойчивость корректируемого локального участка борта карьера.*

Результаты. *По рассчитанным технико-экономическим показателям определено, что все разработанные варианты являются экономически выгодными, однако наиболее целесообразны для реализации два варианта, обеспечивающие максимальные объемы извлечения запасов при выбранной технологии.*

Выводы. *Результаты исследования подтверждают возможность эффективного применения технологических схем перехода на крутонаклонные автосъезды с использованием полноприводных автосамосвалов, а также возможность полного отказа от внутрикарьерных автомобильных съездов ниже определенной глубины карьера с переходом на доставку горной массы по подземным автомобильным съездам. Рассмотренные в исследовании решения позволят на 1,5–2 года увеличить срок отработки месторождения открытым способом. В течение данного периода, согласно ранее выполненным исследованиям, может быть запущен в эксплуатацию подземный рудник для отработки запасов первой очереди.*

Ключевые слова: *вскрытие глубоких горизонтов; законтурные запасы; крутонаклонный автосъезд; подземные вскрывающие выработки; транспортирование горной массы; срок существования карьера.*

Исследование выполнено *за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-10040, https://rscf.ru/project/23-21-10040/.*

Введение. При несвоевременном принятии решения о переходе на подземный способ разработки месторождений после окончания открытых горных работ неминуем период прекращения добычи руды до завершения строительства

подземного рудника [1]. Для избежания этого необходимо заблаговременно принять решение о переходе на подземный способ и начать строительство рудника в процессе эксплуатации карьера [2, 3], либо продлить на период строительства рудника срок эксплуатации карьера путем вовлечения в отработку новых запасов полезных ископаемых, расположенных за пределами проектного контура карьера.

Освоение законтурных запасов открытой геотехнологией обычно связано с решением сложных геомеханических задач, направленных на обоснование устойчивости борта карьера для обеспечения безопасного ведения горных работ [4, 5]. Кроме того, применение традиционных способов вскрытия запасов глубоких горизонтов открытым способом часто затруднено, а в некоторых случаях вовсе не представляется возможным ввиду разных факторов, препятствующих разносу бортов [6].

В последние годы, благодаря тенденциям развития горнотранспортного оборудования, в частности, усовершенствования его конструкций и расширения технических возможностей, заметно увеличился интерес к созданию новых технологических решений по вскрытию и отработке запасов полезных ископаемых, оставшихся за сформированными контурами карьеров. Изыскание новых решений по их вскрытию за счет технологических преимуществ открытого способа разработки имеет особое значение для освоения трудноизвлекаемых запасов, расположенных в непосредственной близости к бортам и дну карьера.

Целесообразность использования выработанного карьерного пространства крутопадающих месторождений в целях вскрытия законтурных запасов доказана накопленным опытом разработки месторождений [7] и обусловлена существенным сокращением сроков и затрат на строительство и ввод в эксплуатацию подземного рудника для дальнейшего освоения запасов подземным способом [8].

В процессе разработки месторождений полезных ископаемых в силу разных горно-геологических, технологических и экономических причин за проектным контуром карьеров может сосредотачиваться значительная доля балансовых запасов [9].

Согласно статистическим данным, после отработки рудных месторождений открытым способом только в бортах карьеров остаются неотработанные запасы – в среднем 5–16 % от общего объема запасов [10]. При этом, если добычу залежей, удаленных от карьеров, ведут около 25 % предприятий, то отработку прибортовых запасов осуществляют всего 18 % [7].

Как правило, освоение законтурных запасов реализуется сложными технологическими решениями, часто с комбинацией открытых и подземных работ. Правильный выбор технологических схем вскрытия законтурных запасов открытой, подземной либо комбинированной геотехнологией должен быть основан на тщательной оценке безопасности и эффективности освоения запасов, потенциальных выгод и рисков, связанных с процессом добычи.

Постановка проблемы и история вопроса. Исследуемое месторождение, находящееся в настоящее время в стадии доработки открытым способом, характеризуется наличием прибортовых и подкарьерных запасов, пригодных для отработки. В ранее выполненных исследованиях, посвященных полной доработке данного месторождения подземным способом, была установлена необходимость строительства подземного рудника до начала этапа доработки карьера с целью обеспечения неразрывной добычи руды. Однако в современных условиях при принятии решения о переходе на подземный способ разработки разрыв в добыче руды будет неизбежен.

Baohui Tan, Fengyu Ren и другие исследователи [11] подчеркивают важность отработки законтурных запасов на дорабатываемых карьерах во время периода перехода от открытых работ к подземным с целью придания плавности этому процессу.

Из результатов изучения мировой практики освоения рудных месторождений комбинированным способом известно, что в 80 % случаев использовалась последовательная схема отработки месторождений, а в 20 % – параллельная. Однако на многих месторождениях, разрабатываемых по последовательной схеме, наблюдались некоторые периоды совмещения открытых и подземных работ. Обе стратегии освоения месторождений имеют свои особенности и недостатки [12]. Эффективность комбинированного способа разработки повышается, когда карьер заблаговременно подготавливается к переходному периоду, особенно при формировании схемы вскрытия глубоких горизонтов [1].

Предложенные в исследованиях технологические схемы перехода с определенной глубины карьера на транспортные бермы с уменьшенной шириной для автосамосвалов меньшей грузоподъемности [13], а также схемы вскрытия крутонаклонными автосъездами, предназначенными для работы полноприводных автосамосвалов с шарнирно-сочлененной рамой [14] способствуют углублению дорабатываемых карьеров, и, следовательно, вовлечению в отработку законтурных запасов из глубоких горизонтов. Схемы вскрытия глубоких горизонтов крутонаклонными автосъездами с использованием шарнирно-сочлененных автосамосвалов были внедрены в проекты разработки кимберлитовых трубок «Комсомольская» и «Юбилейная» Айхальского ГОКа, «Нюрбинская» и «Ботуобинская» Нюрбинского ГОКа и др. [15]. Помимо применения автосъездов с крутым уклоном известны способы вскрытия горизонтов крутопадающих месторождений подземными наклонными автодорогами, предназначенными для транспортирования горной массы автосамосвалами малой грузоподъемности [16]. Конструкция подземного съезда спиральной формы в борту карьера опубликована в 1999 г. [17], предложен вариант вскрытия залежи подземными выработками и отработка запасов открытыми горными работами независимо от их мощности и угла залегания, с формированием предохранительных берм на уступах карьера. Согласно данным решениям, вскрытие горизонтов может быть осуществлено наклонными стволами с конвейером или скиповым подъемником. В 1991 г. Институтом горного дела Севера СО АН СССР опубликовано изобретение [18], предлагающее вскрытие месторождений кимберлитовых, железных и медных руд наклонной спиральной горной выработкой, соединяющейся с бортом карьера горизонтальными выработками. Исследования по применению подобных вскрывающих конструкций в 2017 г. проведены учеными Института «Якутнипроалмаз» на примере трубки «Архангельская» [19], совместно с учеными Уральского государственного горного университета – для карьера «Нюрбинский» [20]. Отличие технологических решений последнего исследования от предыдущих состоит в его применении исключительно для нижних горизонтов карьера.

Таким образом, основываясь на результатах примеров успешной реализации и рекомендациях перечисленных исследований, с целью избежания периода разрыва в добыче руды между открытыми и подземными горными работами, было принято решение о разработке технологических решений для вскрытия законтурных запасов рассматриваемого месторождения крутыми съездами и подземной спиральной автодорогой с последующим обеспечением перехода на комбинированный способ разработки.

Методы исследования. Для выполнения данного исследования построена трехмерная модель карьера с рудными телами, расположенными в непосредственной близости к бортам и дну карьера. В результате анализа близлежащих к проектному контуру карьера рудных тел установлено наличие прибортовых и подкарьерных запасов руды объемом более 4,0 млн т (рис. 1). Руда за проектным контуром карьера схожа по составу с рудой, добываемой открытым способом.

В результате проведенного анализа горнотехнических условий разработки месторождения установлено, что с принятыми ранее проектными параметрами открытой геотехнологии добыть их практически невозможно в связи с наличием на поверхности карьера отвалов вскрышных пород, препятствующих разносу бортов.

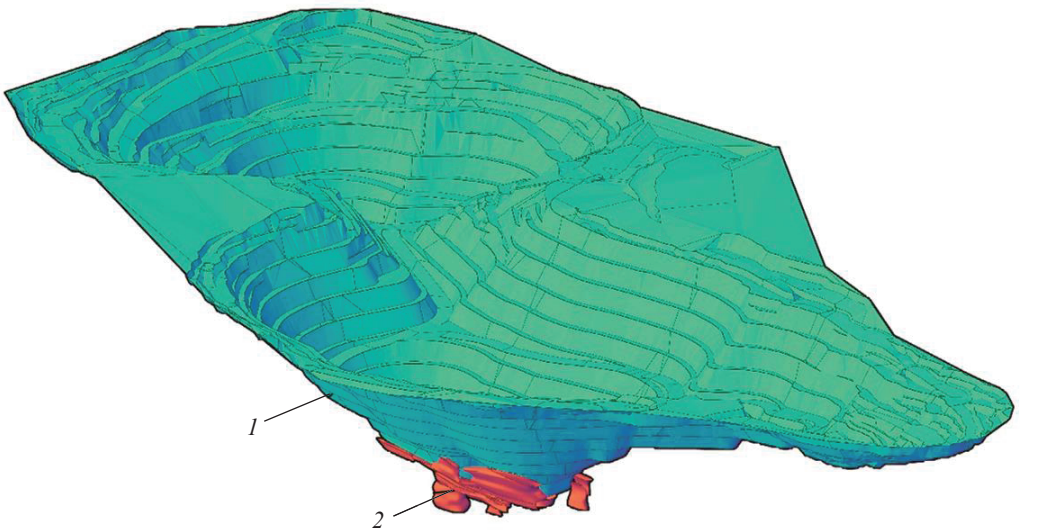

Рисунок 1. Модель карьера с размещением законтурных запасов: *1* – проектный контур карьера; *2* – законтурные рудные тела
Figure 1. The pit model with the sidewall reserves: *1* – designed contour of the pit; *2* – sidewall reserves

Поскольку существующие параметры борта и дна карьера не позволяют создавать транспортный доступ к законтурным запасам, в рамках данного исследования рассмотрены пять вариантов изменения схемы вскрытия, предусматривающие уменьшение ширины транспортных берм и увеличение их продольного уклона при использовании полноприводных автосамосвалов с шарнирно-сочлененной рамой, а также полный отказ от системы автомобильных съездов ниже определенной глубины карьера с обеспечением доступа на рабочие горизонты через подземные наклонные автомобильные съезды, формируемые вокруг борта карьера.

Производительность карьера по руде для всех вариантов была принята равной проектной производительности карьера.

Разработка вариантов вскрытия законтурных запасов.

Вариант № 1 – предусматривает расширение бортов карьера в нижней части за счет уменьшения ширины транспортных берм, в связи с чем вместо проектных двухполосных автодорог приняты однополосные дороги начиная с горизонта +340 м. Дороги имеют проектный уклон 80 ‰ и предназначены для движения

имеющихся на руднике автосамосвалов БелАЗ грузоподъемностью 45 т. Глубина карьера на конец отработки совпадает с проектной глубиной +190 м. Необходимое количество автосамосвалов для реализации варианта составляет 13 ед. Объем извлекаемых законтурных запасов железных руд при данном варианте составляет 338,6 тыс. т.

Варианты № 2, № 3 – предусматривают возможность применения крутонаклонных автосъездов для полноприводных автосамосвалов Volvo A40G с шарнирно-сочлененной рамой. Вариант № 2, как и № 1, предусматривает расширение бортов в нижней части карьера за счет уменьшения ширины транспортных берм, но, в отличие от него, дороги имеют уклон 150 ‰, что дает возможность углубиться до отметки +170 м. Углубление дополнительно на 20 м позволяют вовлечь в отработку 1 256,6 тыс. т законтурной железной руды.

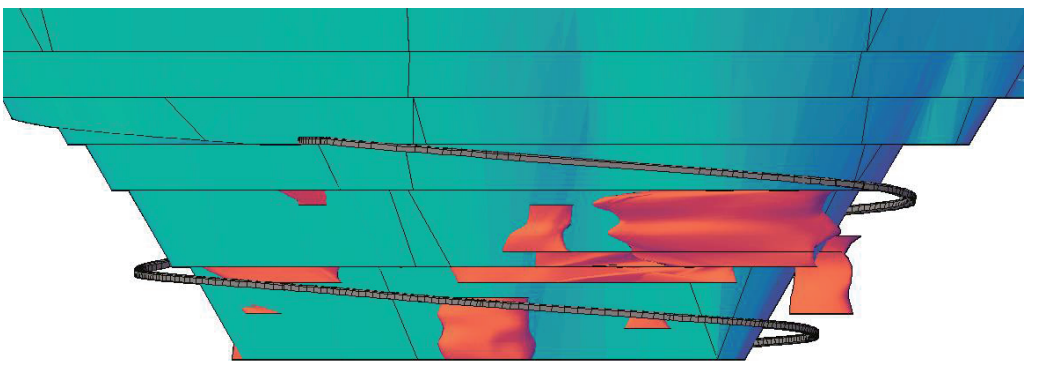

Рисунок 2. Подземный автомобильный съезд за контуром карьера
Figure 2. Underground roadway behind the pit edge

Поскольку при варианте № 2 в подкарьерном пространстве все еще оставались запасы, далее рассмотрен вариант № 3, аналогичный варианту № 2 по принимаемой ширине и уклону автомобильных съездов, но отличающийся углублением карьера до горизонта +160 м. По сравнению с вариантом № 2, углубление дополнительно на 10 м увеличивает количество добываемой законтурной руды на 84 тыс. т. Прирост объема добычи составляет всего 6,7 %, также при данном варианте ширина рабочей площадки на дне карьера уменьшается до минимально возможных размеров для нормальной работы техники, что, конечно, усложняет процесс добычи. Тем не менее необходимо отметить, что данный вариант позволяет максимально извлечь законтурные запасы месторождения с применением крутонаклонных автосъездов.

В варианте № 4 рассмотрена технология с использованием подземных автомобильных съездов спиральной формы (рис. 2). На карьере сохраняются все существующие капитальные траншеи выше горизонта +280 м и осуществляется переход на доставку горной массы по подземным дорогам, что позволяет полностью отказаться от карьерных транспортных берм ниже этой отметки. Руда и вскрышные породы транспортируются автосамосвалами Sandvik TH551i грузоподъемностью 51 т в пункт перегрузки, расположенный на горизонте +310 м, который соединяет северный и южный участки карьера. Здесь же производится погрузка руды и вскрышных пород в автосамосвалы БелАЗ грузоподъемностью 45 т и их дальнейшее транспортирование в пункты разгрузки. Подземный автомобильный съезд

с продольным уклоном 7 % и площадью поперечного сечения 19,8 м^2 расположен в 30 м от борта карьера за зоной сдвижения пород, отстроенной для отработки прибортовых запасов. Въезд в него осуществляется с горизонта +280 м. Имеются горизонтальные выработки, соединяющие его с карьером каждые 10 м углубления. Общая длина наклонной выработки составляет 2 км, за 1 мес осуществляется проходка на 120 м. На конец отработки данным способом карьер будет углублен до горизонта +140 м. Для реализации варианта № 4 требуются самосвалы Sandvik в количестве 12 ед., БелАЗ – 8 ед. Данным вариантом в отработку будет вовлечено 2 426,5 тыс. т законтурной железной руды.

Таблица 1. Сравнение технико-экономических показателей по разработанным вариантам решений
Table 1. Comparison of technical and economic indicators for the developed solutions

Параметр	Вариант вскрытия				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Сроки освоения запасов, лет	2,7	3,1	3,2	3,6	3,8
Запасы, тыс. т:					
всего	6 581,5	7 499,5	7 583,6	8 669,5	9 154,7
в том числе законтурная руда	338,6	1 256,6	1 340,6	2 426,5	2 911,8
Средний коэффициент вскрыши, т/м^3	0,71	0,69	0,69	0,52	0,74
Сравнение затрат с проектным*, %	100	107,92	112,04	146,72	171,38
Сравнение затрат на 1 т руды*, %	100	94,71	97,24	111,38	123,21

* Сравнение вариантов по затратам произведено относительно варианта № 1, при котором величины затрат на добычу 1 т руды приняты в размере 100 %.

Вариант № 5 аналогичен варианту № 4 по технологии производства работ. Отличие состоит в отработке капитальной траншеи на западном борту карьера. Такое решение существенно расширяет борт карьера, позволяя извлечь дополнительные запасы руды. Объем законтурных запасов, извлекаемых данным способом, составляет 2 911,8 тыс. т. Необходимое количество транспортного оборудования: Sandvik TH551i – 15 ед., БелАЗ-75473 – 8 ед.

Для обоснования безопасности предлагаемых схем вскрытия произведены расчеты устойчивости локального участка борта для нижних горизонтов карьера, по результатам которых получены значения коэффициента запаса устойчивости: $K_{з.у}$ = 3,74 для уступа высотой 60 м (вариант № 4) и $K_{з.у}$ = 1,94 для участка борта высотой 110 м (вариант № 5). Установлено, что борт является достаточно устойчивым для реализации предлагаемых технико-экономических решений в принятые сроки.

Обсуждение результатов. Разработанные в данном исследовании пять вариантов вскрытия прибортовых и подкарьерных запасов месторождения отличаются технологиями отработки, объемами добычи, производительностью по вскрыше, типом и количеством принятого горнотранспортного оборудования, а также себестоимостью добычи. Основные результаты расчетов по всем вариантам представлены в табл. 1.

Для всех рассмотренных вариантов рассчитаны технико-экономические показатели, в результате чего два варианта показали наибольшую эффективность и целесообразность для реализации. Определено, что наиболее выгодным по сумме

затрат на 1 т руды является вариант № 2, предусматривающий применение крутонаклонных автосъездов для автосамосвалов с шарнирно-сочлененной рамой; максимальный объем законтурных запасов возможно добыть при варианте № 5, предполагающем использование подземных автомобильных съездов спиральной формы (рис. 3).

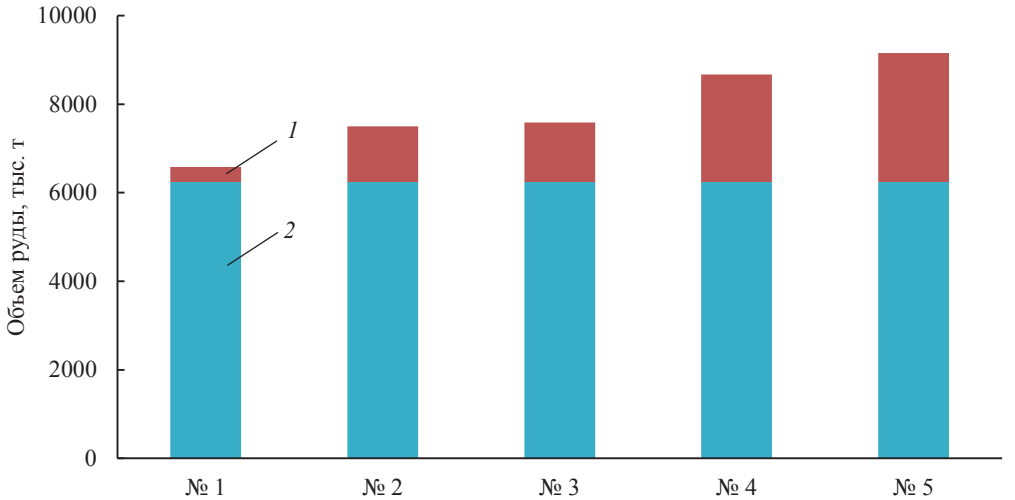

Рисунок 3. Сравнение объемов добычи полезных ископаемых, в том числе законтурных, по каждому варианту: *1* – законтурные запасы; *2* – оставшиеся запасы без учета законтурных руд
Figure 3. Comparison of mining output, including sidewall reserves for each variant: *1* – sidewall reserves; *2* – remaining ore reserves without sidewall reserves

Особенностью предлагаемых технологических решений является адаптация предложенной схемы вскрытия к схеме вскрытия будущего подземного рудника, что позволит ускорить начало добычи руды подземным способом на месторождении.

Выводы. Таким образом, по результатам исследования обоснована возможность эффективного применения перспективных направлений вскрытия глубоких горизонтов дорабатываемых карьеров: крутонаклонными автосъездами и подземными наклонными автосъездами, являющимся частью первого этапа вскрытия подземного рудника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Selection of open-pit mining and technical system's sustainable development strategies based on MCDM // Sustainability. 2022. Vol. 14(13). Art. 38003. DOI: 10.3390/su14138003

2. Григорьев В. В., Калмыков В. Н., Рыльникова М. В. Развитие горных работ в период перехода с открытого на подземный способ разработки Учалинского месторождения // Горный журнал. 2010. № 5. С. 88–92.

3. Afum B. O., Ben-Awuah E. A review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization: some lessons learnt and the way forward // Mining. 2021. Vol. 1(1). P. 112–134. DOI: 10.3390/mining1010008

4. Dintwe T. K. M., Sasaoka T., Shimada H., Hamanaka A., Moses D., Liu S. F., Meng F. F. Effects of sublevel open stope underground mining on surface and open pit slopes // Journal of Geoscience and Environment Protection. 2021. Vol. 9(1). P. 121–131. DOI: 10.4236/gep.2021.91010

5. Рыльникова М. В., Зинуров А. В., Шадрунов В. А. Отработка законтурных запасов в основании бортов карьеров комбинацией элементов открытой, подземной и физико-химической геотехнологии // ГИАБ. 1999. № 3. С. 66–69.

6. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11(3). Art. 549e561. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.010

7. Каплунов Д. Р., Калмыков В. Н., Рыльникова М. В. Комбинированная геотехнология. М.: Руда и металлы, 2003. 560 с.

8. Калмыков В. Н., Гавришев С. Е., Бурмистров К. В., Кидяев В. А. Изменение схемы вскрытия глубоких горизонтов карьеров при открыто-подземной разработке железорудных месторождений // Сталь. 2014. № 4. С. 4–8.

9. Волохов А. В., Сафонов Л. С. Предпосылки для оставления запасов полезных ископаемых за контуром карьера // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 12(71). С. 99–105.

10. Liu K., Zhu W., Wang Q., Liu X. Mining method selection and optimization for hanging-wall ore-body at Yanqianshan iron mine, China // Geotechnical and Geological Engineering. 2017. Vol. 35(1). P. 225–241. DOI: 10.1007/s10706-016-0100-0

11. Baohui Tan, Fengyu Ren, Youjun Ning, Rongxing He, Qiang Zhu. A new mining scheme for hanging-wall ore-body during the transition from open pit to underground mining: a numerical study // Advances in Civil Engineering. 2018. Vol. 2018. P. 1–17. DOI: doi.org/10.1155/2018/1465672

12. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Никитин И. В. Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2021. 340 с.

13. Лель Ю. И., Ильбульдин Д. Х. Обоснование глубины перехода на новые модели автосамосвалов при доработке глубоких карьеров // ГИАБ. 2009. № 6. С. 313–319.

14. Лель Ю. И., Глебов А. В., Ильбульдин Д. Х., Мусиихна О. В., Дунаев С. А. Технологические схемы перехода на новые модели автосамосвалов при доработке глубоких карьеров // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 8. С. 4–12.

15. Зырянов И. В., Решетников С. В. К вопросу о выборе вида карьерных автосамосвалов для кимберлитовых карьеров Якутии // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 5(102). С. 22–25.

16. Акишев А. Н., Лель Ю. И., Ильбульдин Д. Х., Мусихина О. В., Глебов И. А. Технологические решения по вскрытию и отработке глубоких горизонтов Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2017. № 7. С. 4–12.

17. Способ комбинированной разработки месторождений: пат 2132950 C1 Рос. Федерация. № 98101994/03; заявл. 12.02.1998; опубл. 10.07.1999. 7 с.

18. Способ вскрытия горизонтов крутопадающего месторождения: авт. свид.-во SU 1675559 A1 СССР, МПК E21C 41/26; заявл. 17.05.1989; опубл. 07.09.1991. Бюл. № 33. 4 с.

19. Акишев А. Н., Бокий И. Б., Зырянов И. В. К вопросу развития геотехнологии открытой разработки алмазорудных месторождений // Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техносферной безопасности в условиях Северо-Востока России: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч., Якутск, Россия, 25 апреля 2018 года. Якутск: СВФУ, 2018. С. 267–274.

20. Акишев А. Н., Лель Ю. И., Глебов И. А. Инновационная технология вскрытия и разработки глубоких кимберлитовых карьеров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 111–123.

Поступила в редакцию 3 октября 2023 года

Сведения об авторах:

Бурмистров Константин Владимирович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: burmistrov_kv@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3433-133X

Багдасарян Маргар Аветикович – аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: margarbagdasaryan@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-4872-2398

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-38-47

Developing process flow diagrams for opening open-pit sidewall reserves during the transition to combined mining method

Konstantin V. Burmistrov[1], Margar A. Bagdasarian[1]

[1] Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract

Introduction. *Opening of sidewall reserves is mainly done at the stage of underground mining by workings passed from an underground mine or from an open pit. However, when underground mining is impractical due to the specificity of ore bodies position relative to the formed pit edge,*

and opencast mining is inapplicable due to the obstacles that make impossible to work out the pit edge, a difficult task is put forward to develop new process flow schemes for opening such reserves.
The research objective *is to develop process flow schemes for opening open pit sidewall and bottom reserves by increasing the gradient and decreasing the width of the haul roads as well as by switching from haul roads to underground roadways.*
Methods of research. *The research was done on the example of an iron-ore deposit modeling opening scheme variants and making appropriate changes in open pit edges in deep horizons. Based on the mining and geometry analysis, the amount of sidewall reserves has been determined. By comparing technical and economic indicators, the advantages and disadvantages of all the developed process flow solutions were identified, the stability of the local section of the redesigned pit wall was calculated.*
Results. *Based on the calculated technical and economic indicators, it was determined that all the developed variants are profitable. However, two of them are the most efficient as they ensure maximum reserves extraction by the chosen technology.*
Conclusions. *The research results confirm the possibility of efficient application of the process flow schemes of transition to steeply inclined haul roads using four-wheel drive dump trucks, and also show the possibility of switching from the pit roads to underground roads below a certain depth. The developed solutions will allow to extend the period of open-pit mining for 1.5–2 years. During that period, according to previous researches, an underground mine can be launched to extract the reserves of the first stage.*

Keywords: *opening of open pit deep horizons; open-pit sidewall reserves; steeply inclined haul ramps; underground opening workings; transportation of rock mass; life of mine.*

The research was funded *by the Russian Science Foundation grant no. 23-21-10040, https://rscf.ru/project/23-21-10040/.*

REFERENCES

1. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Selection of open-pit mining and technical system's sustainable development strategies based on MCDM. *Sustainability.* 2022; 14(13): 38003. Available from: doi: 10.3390/su14138003

2. Grigoriev V. V., Kalmykov V. N., Rylnikova M. V. Development of mining work in excavation method changing of the Uchalinskoe deposit. *Gornyi zhurnal = Mining Journal.* 2010; 5: 88–92. (In Russ.)

3. Afum B. O., Ben-Awuah E. A review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization: some lessons learnt and the way forward. Mining. 2021; 1(1): 112–134. Available from: doi: 10.3390/mining1010008

4. Dintwe T. K. M., Sasaoka T., Shimada H., Hamanaka A., Moses D., Liu S. F., Meng F. F. Effects of sublevel open stope underground mining on surface and open pit slopes. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2021; 9(1): 121–131. Available from: doi: 10.4236/gep.2021.91010

5. Rylnikova M. V., Zinurov A. V., Shadrunov V. A. Mining sidewall reserves at the bottom of an open pit side by a combination of the elements of opencast, underground, and physico-chemical geotechnologies. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 1999; 3: 66–69. (In Russ.)

6. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel "macroblock variant" block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 2019; 11(3): 549–561. Available from: doi: 10.1016/j.jrmge.2018.08.010

7. Kaplunov D. R., Kalmykov V. N., Rylnikova M. V. *Combined geotechnology*. Moscow: Ruda i metally Publishing; 2003. (In Russ.)

8. Kalmykov V. N., Gavrishev S. E., Burmistrov K. V., Kidiaev V. A. The modification in the scheme of opening deep levels in strip-underground mining in iron ore deposits. *Stal = Steel.* 2014; 4: 4–8. (In Russ.)

9. Volokhov A. V., Safonov L. S. Conditions for abandoning mineral reserves outside mine contour. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2012; 12(71): 99–105. (In Russ.)

10. Liu K., Zhu W., Wang Q., Liu X. Mining Method selection and optimization for hanging-wall ore-body at Yanqianshan iron mine, China. *Geotechnical and Geological Engineering.* 2017; 35(1): 225–241. Available from: doi: 10.1007/s10706-016-0100-0

11. Baohui Tan, Fengyu Ren, Youjun Ning, Rongxing He, Qiang Zhu. A new mining scheme for hanging-wall ore-body during the transition from open pit to underground mining: a numerical study. *Advances in Civil Engineering.* 2018; 2018: 1–17.

12. Sokolov I. V., Antipin Iu. G., Nikitin I. V. *Methods of choosing underground geotechnology under combined orefields development.* Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta Publishing; 2021. (In Russ.)

13. Lel Iu. I., Ilbuldin D. Kh. The justification of the depth of passing to new models of dump. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2009; 6: 313–319. (In Russ.)

14. Lel Iu. I., Glebov A. V., Ilbuldin D. Kh., Musiikhna O. V., Dunaev S. A. Flowsheets of transition to new models of haulage trucks when cleaning-up deep open pits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2015; 8: 4–12. (In Russ.)

15. Zyrianov I. V., Reshetnikov S. V. To the issue of selecting the type of mine dump trucks for kimberlite open pits of Yakutia. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics.* 2014; 5(102): 22–25. (In Russ.)

16. Akishev A. N., Lel Iu. I., Ilbuldin D. Kh., Musikhina O. V., Glebov I. A. Technological solutions for the Alrosa group Nyurbinsky open pit deep horizons exposing and processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 7: 4–12. (In Russ.)

17. Iun R. B., Borshch-Komponiets V. I. *Method for combined mining of fields.* Patent RF no. 2132950 C1; 1999. (In Russ.)

18. Zaudalskii I. I. *A method of stripping the horizons of steep deposits.* Inventor's certificate USSR no. SU 1675559 A1; 1989. (In Russ.)

19. Akishev A. N., Bokii I. B., Zyrianov I. V. On the development of geotechnology for open-cast mining of diamond deposits. In: *Improvement of mining technologies and training of personnel for technosphere safety in conditions of the north-east Russia: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, 25 April, 2018.* Yakutsk: 2018. p. 267–274. (In Russ.)

20. Akishev A. N., Lel Iu. I., Glebov I. A. The innovative technology of stripping and mining deep kimberlite open pits. Izvestiia Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. *Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences.* 2019; 3: 111–123. (In Russ.)

Received 3 October 2023

Information about the authors:

Konstantin V. Burmistrov – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Mineral Deposit Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: burmistrov_kv@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3433-133X

Margar A. Bagdasarian – PhD student, Department of Mineral Deposit Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: margarbagdasaryan@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-4872-2398

Для цитирования: Бурмистров К. В., Багдасарян М. А. Разработка технологических схем вскрытия законтурных запасов руды при переходе на открыто-подземный способ разработки месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 1. С. 38–47. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-38-47

For citation: Burmistrov K. V., Bagdasarian M. A. Developing process flow diagrams for opening open-pit sidewall reserves during the transition to combined mining method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2024; 1: 38–47 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-38-47