

Определение оптимального места расположения автоуклона в карьере при вскрытии подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений

Соколов И. В.¹, Никитин И. В.^{1*}

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: opening-kr@yandex.ru

Реферат

Введение. При комбинированной разработке кимберлитовых месторождений весьма важным является вопрос выбора рационального варианта вскрытия подкарьерных запасов. Исследования показывают, что применение схем вскрытия, основанных на использовании карьера для размещения в нем вскрывающих выработок подземного рудника, в том числе рудовыдачных, позволяет существенно снизить капитальные и эксплуатационные затраты. В качестве рудовыдачных выработок рудника в основном используются автоуклоны. В настоящее время отсутствует методика определения оптимального места расположения рудовыдачного автоуклона в карьере с учетом границ зоны сдвижения горных пород в результате ведения подземных горных работ.

Цель исследований – разработка методических положений и рекомендаций по выбору оптимального места расположения рудовыдачного автоуклона в карьере при вскрытии подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений в зависимости от глубины карьера и величины шага (глубины) вскрытия с учетом границ зоны сдвижения горных пород.

Методы исследований. В работе использован комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение теории и практики вскрытия месторождений, осваиваемых комбинированным способом, экономико-математическое моделирование и сравнительный анализ.

Результаты. Разработана методика определения оптимальной глубины заложения портала рудовыдачного автоуклона в карьере при вскрытии подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений по критерию минимума суммарных затрат на транспортирование руды подземными и карьерными автосамосвалами с учетом границ зоны сдвижения горных пород.

Выводы. Установлено, что в условиях кимберлитовых месторождений, отработанных карьером на глубину от 400 до 600 м, оптимальная глубина заложения портала рудовыдачного автоуклона в карьере при его использовании в течение всего периода доработки определяется углом сдвижения вмещающих пород и генеральным углом наклона бортов карьера и находится в диапазоне от 0 (на поверхности) до 0,56 глубины карьера, а при его использовании только на первом этапе – минимумом суммарных затрат на транспортирование руды и составляет 0,63 глубины карьера.

Ключевые слова: кимберлитовое месторождение; подкарьерные запасы; вскрытие; автоуклон; транспортирование руды; экономико-математическое моделирование; затраты на транспортирование.

Исследования выполнены в рамках Госзадания Минобрнауки № 075-00412-22 ПР. Тема 1. FUWE-2022-0005.

Введение. Переход с открытого на подземный способ разработки на кимберлитовых месторождениях осуществляется, как правило, при достижении предельной по технико-экономическим условиям глубины карьера с учетом наличия значительных запасов под дном карьера [1]. В этих условиях задача обоснования

рационального варианта вскрытия подкарьерных запасов является первостепенной и одной из наиболее сложных, поскольку требует комплексного решения вопросов выбора способа и схемы вскрытия и подготовки запасов, схемы вентиляции и водоотлива, вида и схемы транспортирования добытой руды и пустой породы, а также места расположения вскрывающих выработок подземного рудника с учетом их назначения и срока службы.

В мировой практике вскрытия запасов за предельным контуром карьера достаточно широкое применение получили схемы, предусматривающие использование карьерного пространства для размещения в нем вскрывающих выработок подземного рудника. Наиболее перспективным вариантом таких схем является использование карьера в качестве рудовыдачной выработки. Это решение позволяет не только сократить объем капитальных вложений, но и снизить эксплуатационные расходы предприятия [2, 3]. Использование карьера для целей вскрытия и выдачи руды из шахты предполагает устройство в нем перегрузочных пунктов, поддержание карьерных дорог и коммуникаций, поэтому чаще всего ограничивается периодом освоения переходной зоны, т. е. в пределах верхнего подкарьерного этажа (рудники «Принс-Лайэл» (Австралия), «Элен» (Канада), «Чамбиши» (Замбия), «Учалинский» (Россия) и др.) [4]. Однако известны примеры его использования в течение всего периода доработки месторождения (рудники «Тьюктоник бор» (Австралия), «Ваммала» (Финляндия), «Молодежный» (Россия) и др.) [5]. Наибольшее распространение получила комбинация карьерного и подземного автомобильного транспорта с перегрузкой руды с помощью экскаваторов. В качестве рудовыдачных выработок подземного рудника в основном используются автотранспортные уклоны.

Разработке научно-методических основ определения рационального местоположения шахтных стволов и оптимальных параметров вскрытия (высоты этажа, размеров шахтного поля, величины шага вскрытия, расстояния между концентрационными горизонтами) при подземной и комбинированной разработке месторождений посвящены труды академиков М. И. Агошкова и Л. Д. Шевякова, члена-корреспондента РАН Д. Р. Каплунова и ряда других исследователей [6–11]. Наряду с этим в настоящее время отсутствует методика определения оптимального места расположения рудовыдачного автоуклона в карьере в зависимости от глубины карьера и глубины вскрытия с учетом границ зоны сдвижения горных пород в результате ведения подземных горных работ.

Таким образом, разработка методических положений и рекомендаций по выбору оптимального места расположения рудовыдачного автоуклона в карьере при вскрытии подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений в рамках исследований по разработке методологических принципов оптимизации параметров технологических процессов горного производства с учетом их взаимосвязи в динамике развития горнотехнических систем [12] является актуальной научно-технической задачей.

Методика проведения исследований. При применении схем вскрытия, основанных на использовании карьера и его транспортных систем, одним из основных технологических параметров вскрытия является глубина заложения портала рудовыдачного автоуклона в карьере. Ее оптимальную величину предложено определять по критерию минимума суммарных годовых затрат на транспортирование руды шахтными автосамосвалами (ШАС) от блокового рудоспуска до перегрузоч-

ного пункта в карьере и карьерными автосамосвалами (КАС) от перегрузочного пункта в карьере до рудного склада на поверхности $\Sigma \mathcal{E}_{\text{тр}}$. Математическое описание целевой функции:

$$\sum \mathcal{E}_{\text{тр}} = \mathcal{E}_{\text{тр шас}} \frac{H_{\text{к}} - h_3}{H_{\text{к}}} + \mathcal{E}_{\text{тр кас}} \frac{h_3}{H_{\text{к}}} \rightarrow \min,$$

где $\mathcal{E}_{\text{тр шас}}$ – максимальные годовые затраты на транспортирование руды ШАС по выработкам подземного рудника, млн р./год; $H_{\text{к}}$ – глубина карьера, м; h_3 – глубина заложения портала рудовыдачного автоуклона в карьере относительно поверхности, м; $\mathcal{E}_{\text{тр кас}}$ – максимальные годовые затраты на транспортирование руды КАС по карьерным автосъездам, млн р./год.

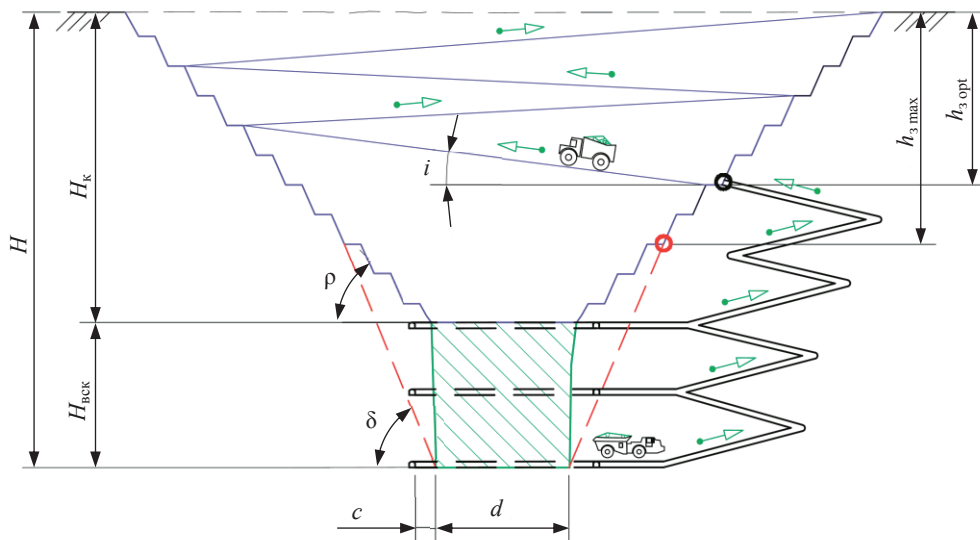


Рисунок 1. Схема к определению оптимальной глубины заложения портала рудовыдачного автоуклона в карьере

Figure 1. Scheme for determining the optimal depth of the portal of rock-hoisting truck declines in the pit

Максимальные годовые затраты на транспортирование руды ШАС по выработкам подземного рудника определяются исходя из условия расположения портала автоуклона на поверхности ($h_3 = 0$) с учетом величины шага (глубины) вскрытия подкарьерных запасов [13, 14]:

$$\mathcal{E}_{\text{тр шас}} = L_{\text{тр шас}} C_{\text{тр шас}} A_{\text{шх}} = \left(\frac{H_{\text{к}} + 0,5H_{\text{вск}}}{1000 \sin \beta} + \frac{H_{\text{к}}}{1000 \text{tg } \rho} + \frac{\pi(d + 2c)}{4000} \right) C_{\text{тр шас}} A_{\text{шх}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{тр шас}}$ – средняя длина транспортирования руды ШАС, км; $C_{\text{тр шас}}$ – себестоимость транспортирования руды ШАС, р./т · км; $A_{\text{шх}}$ – годовая производственная мощность рудника, млн т; d – средний диаметр трубки, м; c – безопасное расстояние от выработки до рудного тела, м; β – угол наклона вскрывающей выработки – автоуклона, град; ρ – генеральный угол наклона бортов карьера, град; $H_{\text{вск}}$ – величина шага вскрытия, м (при использовании автоуклона в течение всего периода доработки месторождения $H_{\text{вск}} = H - H_{\text{к}}$, при использовании на первом этапе $H_{\text{вск}} = H_{\text{пэт}}$, H – глубина разведанных запасов трубки, м; $H_{\text{пэт}}$ – высота верхнего подкарьерного этажа, м).

Максимальные годовые затраты на транспортирование руды КАС по карьерным автосъездам определяются исходя из условия расположения портала автоуклона на дне карьера ($h_3 = H_k$) с учетом горизонтальных участков длиной 50 м через каждые 600 м длины уклона [15]:

$$\mathcal{E}_{\text{тр кас}} = L_{\text{тр кас}} C_{\text{тр кас}} A_{\text{шх}} = \frac{H_k}{1000 \sin(i + i/12)} C_{\text{тр кас}} A_{\text{шх}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{тр кас}}$ – средняя длина транспортирования руды КАС, км; $C_{\text{тр кас}}$ – себестоимость транспортирования руды КАС, р./т · км; i – продольный уклон карьерного автосъезда, град.

Таблица 1. Изменение длины транспортирования ШАС и КАС с увеличением глубины заложения портала автоуклона в карьере

Table 1. Changing the length of transportation of mine dump truck and pit dump truck with the growing depth of the portal of rock-hoisting truck declines in the pit

Глубина заложения автоуклона в карьере, м	Длина транспортирования ШАС, км			Длина транспортирования КАС, км		
	Глубина карьера, м			Глубина карьера, м		
	400	500	600	400	500	600
<i>Использование автоуклона в течение всего периода доработки</i>						
0	4,71	5,17	5,63	0	0	0
100	3,89	4,35	4,81	1,39	1,39	1,39
200	3,07	3,53	3,99	2,78	2,78	2,78
300	2,26	2,71	3,17	4,17	4,17	4,17
400	1,44	1,90	2,36	5,56	5,56	5,56
500	–	1,08	1,54	–	6,95	6,95
600	–	–	0,72	–	–	8,34
<i>Использование автоуклона только на первом этапе</i>						
0	3,63	4,45	5,27	0	0	0
100	2,81	3,63	4,45	1,39	1,39	1,39
200	2,00	2,81	3,63	2,78	2,78	2,78
300	1,18	2,00	2,81	4,17	4,17	4,17
400	0,36	1,18	2,00	5,56	5,56	5,56
500	–	0,36	1,18	–	6,95	6,95
600	–	–	0,36	–	–	8,34

Анализ расчетных формул (1) и (2) показал, что определяющую роль в положении оптимальной точки (рис. 1) имеют отношения $L_{\text{тр кас}} / L_{\text{тр шас}}$ и $C_{\text{тр кас}} / C_{\text{тр шас}}$. При этом оптимальная точка не может быть ниже, а в математическом виде не может быть больше величины, определенной по условию размещения автоуклона за зоной сдвига горных пород. Это ограничивающее условие описано неравенством, учитывающим угол сдвига вмещающих пород и генеральный угол наклона бортов карьера:

$$h_{3 \text{ opt}} \leq h_{3 \text{ max}} = \left(\left(\frac{H_k}{\text{tg} \rho} - \frac{H_k + H_{\text{вск}}}{\text{tg} \delta} \right) + \left(\frac{H_k}{\text{tg} \rho} - \frac{H_k + H_{\text{вск}}}{\text{tg} \delta} \right) \text{tg} \rho \right) \text{tg} \rho, \quad (3)$$

где $h_{3 \text{ opt}}$ – оптимальная по технологическому условию (критерию $\Sigma \mathcal{E}_{\text{тр}} \rightarrow \min$) глубина заложения портала рудовыдачного автоуклона в карьере, м; $h_{3 \text{ max}}$ – предельная

по геомеханическому условию глубина заложения портала рудовыдачного автоуклона в карьере, м; δ – угол сдвижения вмещающих пород, град. Схема к определению $h_{3\text{opt}}$ и $h_{3\text{max}}$ представлена на рис. 1.

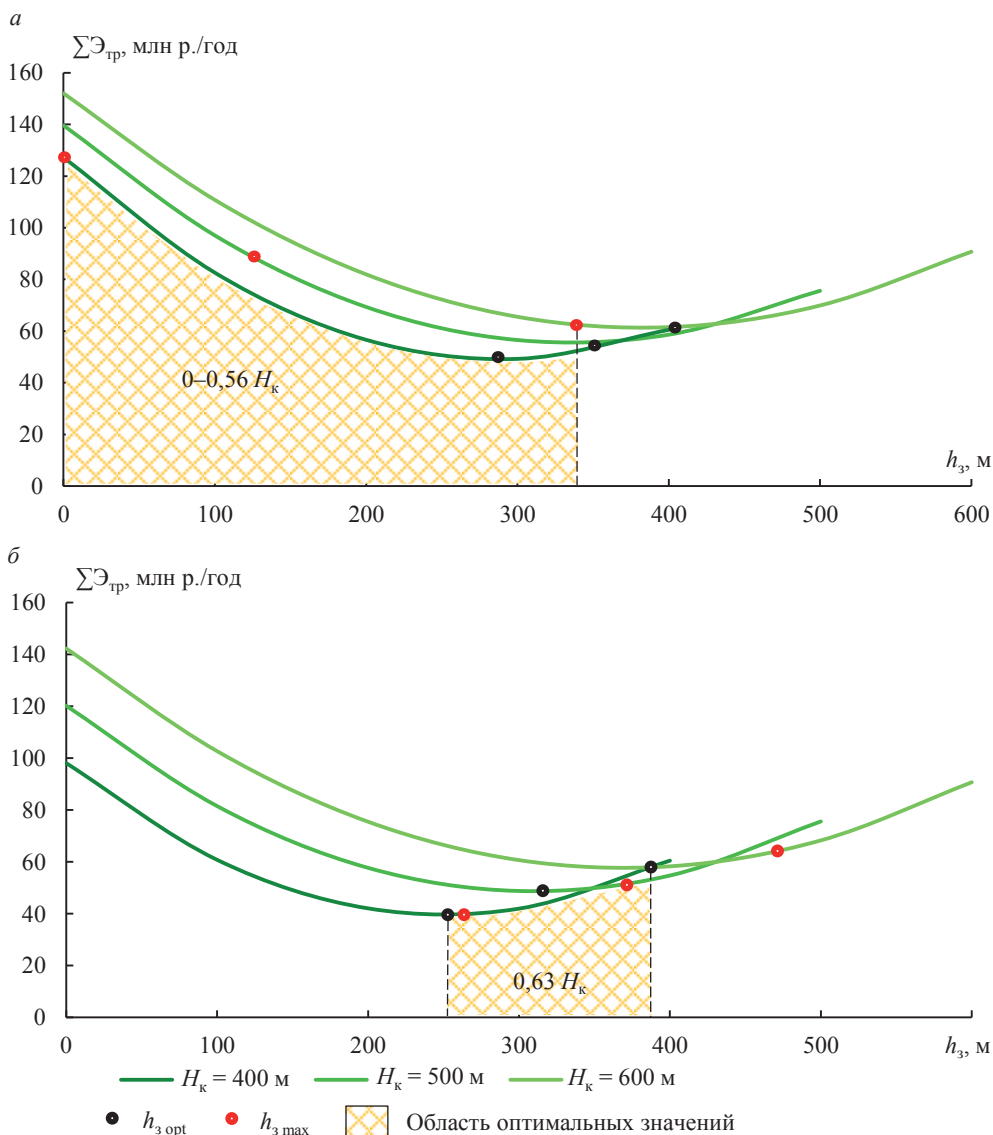


Рисунок 2. Зависимости суммарных затрат на транспортирование руды $\Sigma \mathcal{E}_{\text{тр}}$ от глубины заложения портала автоуклона в карьере h_3 и глубины карьера H_k : а – при $H_{\text{вск}} = H - H_k$; б – при $H_{\text{вск}} = H_{\text{пэт}}$

Figure 2. Dependence between the total cost of ore transportation $\Sigma \mathcal{E}_{\text{тр}}$ and the depth of the portal of rock-hoisting truck declines in the pit h_3 and the depth of the pit H_k : а – under $H_{\text{вск}} = H - H_k$; б – under $H_{\text{вск}} = H_{\text{пэт}}$

Предложенная методика является развитием теоретических основ стратегии комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых подземными и комбинированными геотехнологиями с учетом переходных процессов [5, 16] и позволяет установить оптимальное место заложения портала рудовыдачного

автоуклона в карьере при вскрытии подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений в зависимости от H_k , H , δ , β , i , ρ и $A_{\text{шх}}$ при различных $H_{\text{вск}}$.

Результаты исследований. Для определения оптимальной глубины заложения портала рудовыдачного автоуклона в карьере использован метод экономико-математического моделирования (ЭММ) [17]. В качестве примера рассмотрены условия кимберлитовой трубки «Нюрбинская», характеризующиеся наличием глубокого карьера с малыми размерами в плане и значительных объемов разведанных запасов под дном карьера. Исходные параметры, принятые для ЭММ: $d = 130$ м, $\delta = 65^\circ$, $H = 800$ м, $H_k = 500$ м, $\rho = 50^\circ$, $\beta = 8^\circ$, $C_{\text{тр шас}} = 36$ р./т · км (ШАС грузоподъемностью 40 т), $\omega = 4,5^\circ$ (~ 80 %), $C_{\text{тр кас}} = 14,5$ р./т · км (КАС грузоподъемностью 90 т), $A_{\text{шх}} = 0,75$ млн т/год [18–21].

На первом этапе определены $L_{\text{тр шас}}$ и $L_{\text{тр кас}}$ в зависимости от h_3 и H_k при $H_{\text{вск}} = H - H_k$ или $H_{\text{вск}} = H_{\text{пт}}$. Результаты ЭММ приведены в табл. 1.

На основе данных табл. 1 установлено, что отношение $L_{\text{тр кас}} / L_{\text{тр шас}}$ находится в диапазоне от 1,18 до 1,56, что свидетельствует о превышении $L_{\text{тр кас}}$ над $L_{\text{тр шас}}$ с резким нарастанием по мере увеличения H_k и является весомым фактором смещения $h_{3 \text{ опт}}$ в сторону ее уменьшения. Вместе с тем, отношение $C_{\text{тр кас}} / C_{\text{тр шас}}$ равно 0,4, что определяет общую направленность смещения $h_{3 \text{ опт}}$ в сторону ее увеличения. Следовательно, величина $h_{3 \text{ опт}}$ определяется уровнем влияния разнонаправленных факторов.

На втором этапе построены графические зависимости $\Sigma \Xi_{\text{тр}}$ от h_3 и H_k при $H_{\text{вск}} = H - H_k$ или $H_{\text{вск}} = H_{\text{пт}}$ в виде парабол с вершинами в точке минимума, по величинам которых определены $h_{3 \text{ опт}}$ с учетом $h_{3 \text{ max}}$, рассчитанной по формуле (3). Полученные зависимости представлены на рис. 2.

Установлено, что при $H_{\text{вск}} = H - H_k$ величина $h_{3 \text{ опт}}$ в зависимости от H_k находится в диапазоне от 280 до 410 м, а $h_{3 \text{ max}}$ – от 0 до 340 м. В этом случае $h_{3 \text{ опт}}$ определяется по геомеханическому условию, поскольку $h_{3 \text{ опт}} > h_{3 \text{ max}}$, и принимается в интервале $0 - 0,56 H_k$. При $H_{\text{вск}} = H_{\text{пт}}$ величина $h_{3 \text{ опт}}$ в зависимости от H_k находится в диапазоне от 250 до 380 м, а $h_{3 \text{ max}}$ – от 270 до 460 м. В этом случае $h_{3 \text{ опт}}$ определяется по технологическому условию, поскольку $h_{3 \text{ опт}} < h_{3 \text{ max}}$, и принимается равной $0,63 H_k$.

Выводы. В результате моделирования установлено, что в условиях кимберлитовых месторождений, обработанных карьером на глубину $H_k = 400 - 600$ м, оптимальная глубина заложения портала рудовыдачного автоуклона в карьере при вскрытии всех подкарьерных запасов определяется углом сдвигающих пород и генеральным углом наклона бортов карьера и находится в диапазоне от 0 (на поверхности) до $0,56 H_k$, а при вскрытии только верхнего подкарьерного этажа – минимумом суммарных годовых затрат на транспортирование руды ШАС и КАС и составляет $0,63 H_k$.

Область применения результатов. Приведенные методические положения и результаты исследований рекомендуется использовать при разработке технико-экономического обоснования и проектировании схем вскрытия, основанных на использовании карьера и его транспортных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клишин В. И., Филатов А. П. Подземная разработка алмазонасных месторождений Якутии. Новосибирск: СО РАН, 2008. 333 с.
2. Гибадуллин З. Р., Калмыков В. Н., Петрова О. В. Технологические схемы транспортирования рудной массы при подземной обработке приконтурных запасов карьеров. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2016. 158 с.
3. Raufovich U. S., Lola S. Theoretical studies of the influence of deep pit parameters on the choice of technological schemes for transporting rock mass // Solid State Technology. 2020. Vol. 63. No. 6. P. 429–433.

4. Каплунов Д. Р., Калмыков В. Н., Рыльникова М. В. Комбинированная геотехнология. М.: Руда и металлы, 2003. 560 с.
5. 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.
6. Воронюк А. С., Макишин В. Н., Иванов В. И. Научные основы и методы определения рационального вскрытия рудных месторождений. Владивосток: ДВГТУ, 2011. 117 с.
7. Рыльникова М. В., Калмыков В. Н., Ивашов Н. А. Эффективные схемы вскрытия при комбинированной разработке рудных месторождений // Недропользование – XXI век. 2007. № 2(3). С. 44–48.
8. Демидов Ю. В., Звонарь А. Ю. Методические принципы проектирования схем вскрытия при комбинированной технологии разработки рудных месторождений // Горный журнал. 2009. № 6. С. 57–59.
9. Lukichev S. V., Belogorodtsev O. V., Gromov E. V. Justification of methods to open up ore bodies with various combinations of conveyor transport // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 3. P. 513–521.
10. 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
11. Whittle D., Brazil M., Grossman P. A., Rubinstein J. H., Thomas D. A. Combined optimization of an open-pit mine outline and the transition depth to underground mining // European Journal of Operational Research. 2018. Vol. 268(2). P. 624–634. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.02.005
12. Яковлев В. Л. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых // Горная промышленность. 2022. № S1. С. 34–45. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45
13. Воронюк А. С. Этапность развития вскрытия и разработки запасов рудных месторождений с учетом периодического технического переоснащения подземных рудников // Труды Дальневосточного государственного технического университета. 2003. № 135. С. 137–152.
14. Никитин И. В. Оптимизация параметров вскрытия при подземной разработке подкарьерных запасов кимберлитового месторождения // Проблемы недропользования. 2017. № 1(12). С. 21–28. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.021
15. Журавлев А. Г. Влияние продольного профиля трассы на технико-экономические показатели карьерных автосамосвалов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 04–05 апреля 2019 года / под общ. ред. Ю. А. Лагуновой. Екатеринбург: УГГУ, 2019. С. 435–438.
16. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Никитин И. В. Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом // ГИАБ. 2017. № 9. С. 151–160.
17. Gass S. I. Linear programming: methods and applications. New York: Dover Publications, Fifth Edition, 2010. 544 p.
18. Акишев А. Н., Зырянов И. В., Корнилов С. В., Кантемиров В. Д. Совершенствование методов обоснования производственной мощности и срока существования алмазородных карьеров // ФТПРПИ. 2017. № 1. С. 77–83.
19. Лель Ю. И., Глебов И. А., Буднев А. Б., Исаков С. В., Ганиев Р. С. К обоснованию параметров крутонаклонных автосъездов при вскрытии глубоких горизонтов кимберлитовых карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 7. С. 21–32. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-21-32
20. Журавлев А. Г., Буднев А. Б. Влияние грузоподъемности автосамосвалов на себестоимость горных работ по мере углубки карьера // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 2. С. 20–31. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-20-31
21. Булатов К. В., Дик Ю. А., Котенков А. В., Танков М. С., Кульминский А. С., Тишков М. В., Кульминский А. А. Новые технологические решения разработки кимберлитовых месторождений Якутии. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2022. 540 с.

Поступила в редакцию 13 февраля 2024 года

Сведения об авторах:

Соколов Игорь Владимирович – доктор технических наук, действительный член Академии горных наук, главный научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, директор Института горного дела УрО РАН. E-mail: direct@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7841-5319>

Никитин Игорь Владимирович – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН. E-mail: opening-kp@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

Determining the optimal location for a truck decline in a pit when opening pit reserves at kimberlite deposits

Igor V. Sokolov¹, Igor V. Nikitin¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. Choosing rational variant of pit reserves opening is crucial under the combined mining of kimberlite deposits. Research shows, that the use of the opening schemes which place the underground mine openings, including rock-hoisting ones, in the pit makes it possible to significantly reduce capital and operating costs. Truck declines are mainly used as rock-hoisting workings of the mine. There is currently no method for determining the optimal location of the rock-hoisting truck decline in the pit, taking into account the boundaries of rock displacement zone as result of underground mining.

Research objective is to develop methodological provisions and recommendations for choosing the optimal location of the rock-hoisting truck decline in the pit when opening pit reserves of kimberlite deposits, depending on the pit depth and the size of step (depth) of opening, taking into account the boundaries of the rock displacement zone.

Methods of research. The work uses a comprehensive research method, including an analysis and generalization of the theory and practice of opening deposits developed by combined method, economic and mathematical modeling and comparative analysis.

Research results. A method for determining the optimal depth of laying the portal of rock-hoisting truck declines in the pit when opening pit reserves of kimberlite deposits according to the criterion of minimum total costs for transporting ore by underground and pit dump trucks, taking into account the boundaries of the rock displacement zone, has been developed.

Conclusions. It was found that in the conditions of kimberlite deposits worked out by pit to the depth of 400 to 600 m, the optimal depth of laying the portal of rock-hoisting truck declines in the pit and using them during the entire period of cleaning-up is determined by the angle of the host rocks displacement and the general angle of the pit walls inclination and is in the range from 0 (on the surface) to 0.56 of the pit depth. When it is used only at the first stage, it is determined by the minimum total cost of ore transportation and makes 0.63 of the pit depth.

Keywords: kimberlite deposit; pit reserves; opening; truck decline; ore transportation; economic and mathematical modeling; transportation costs.

The research was carried out within the State Assignment of the Ministry of Education and Science no. 075-00412-22 PR. Theme 1. FUWE-2022-0005.

REFERENCES

1. Klishin V. I., Filatov A. P. *Underground development of diamondiferous deposits of Yakutia*. Novosibirsk: SB RAS Publishing; 2008. (In Russ.)
2. Gibadullin Z. R., Kalmykov V. N., Petrova O. V. *Process schemes of ore transportation when developing marginal reserves of an open pit by an underground method*. Magnitogorsk: MSTU Publishing; 2016. (In Russ.)
3. Raufovich U. S., Lola S. Theoretical studies of the influence of deep pit parameters on the choice of technological schemes for transporting rock mass. *Solid State Technology*. 2020; 63(6): 429–433.
4. Kaplunov D. R., Kalmykov V. N., Rylnikova M. V. *Integrated geotechnology*. Moscow: Ruda i metally Publishing; 2003. (In Russ.)
5. Sokolov I. V., Antipin Iu. G., Nikitin I. V. *The methods of choosing an underground geotechnology under the integrated development of ore deposits*. Ekaterinburg: Ural University Publishing; 2021. (In Russ.)
6. Voroniuk A. S., Makishin V. N., Ivanov V. I. *Scientific fundamentals and methods of determining ore deposits rational stripping*. Vladivostok: FESTU Publishing; 2011. (In Russ.)
7. Rylnikova M. V., Kalmykov V. N., Ivashov N. A. Efficient schemes of stripping under the integrated development of ore deposits. *Subsoil Use – 21st century*. 2007; 2(3): 44–48. (In Russ.)
8. Demidov Iu. V., Zvonar A. Iu. Methodical principles of designing of opening schemes combined technology for development of ore deposits. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2009; 6: 57–59. (In Russ.)
9. Lukichev S. V., Belogorodtsev O. V., Gromov E. V. Justification of methods to open up ore bodies with various combinations of conveyor transport. *Journal of Mining Science*. 2015; 51(3): 513–521.
10. 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

11. Whittle D., Brazil M., Grossman P. A., Rubinstein J. H., Thomas D. A. Combined optimisation of an open-pit mine outline and the transition depth to underground mining. *European Journal of Operational Research*. 2018; 268(2): 624–634. Available from: doi: 10.1016/j.ejor.2018.02.005
12. Yakovlev V. L. Key stages and results of research to formulate methodological basis for the strategy to develop mining systems for deep-seated deposits of solid minerals. *Gornaia promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2022; S1: 34–45. (In Russ.) Available from: doi: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45
13. Voroniuk A. S. Stages of opening and development of ore deposit reserves, taking into account repeated technical re-equipment of underground mines. *Trudy Dalnevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Far Eastern State Technical University*. 2003; 135: 137–152. (In Russ.)
14. Nikitin I. V. Optimization the parameters of opening in underground development of the kimberlite deposit underlying reserves. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2017; 1(12): 21–28. (In Russ.) Available from: doi: 10.18454/2313-1586.2017.01.021
15. Zhuravlev A. G. Influence of longitudinal profile of roads on the technical and economical indicators of dump trucks. In: Iu. A. Logunova (ed.) *Process equipment for mining and oil and gas industry: Proceedings of the 7th Internat. scient. and pract. conf. Ekaterinburg, 04–05 April 2019*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2019. P. 435–438. (In Russ.)
16. Sokolov I. V., Antipin Iu. G., Nikitin I. V. Basic principles and assessment criteria of technological strategy for underground mining in transition zones. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 9: 151–160. (In Russ.)
17. Gass S. I. *Linear programming: methods and applications*. New York: Dover Publications, Fifth Edition, 2010.
18. Akishev A. N., Zyrianov I. V., Kornilkov S. V., Kantemirov V. D. Improving evaluation methods for production capacity and life of open pit diamond mines. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2017; 1: 77–83. (In Russ.)
19. Lel Iu. I., Glebov I. A., Budnev A. B., Isakov S. V., Ganiev R. S. Rationale for the parameters of steeply inclined ramps of kimberlite pits deep horizons exposing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 7: 21–32 (In Russ.). Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2020-7-21-32
20. Zhuravlev A. G., Budnev A. B. The influence of dump trucks payload capacity on the prime cost of mining with the increase in the depth of an open pit *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 2: 20–31. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2019-2-20-31
21. Bulatov K. V., Dik Iu. A., Kotenkov A. V., Tankov M. S., Kulminskii A. S., Tishkov M. V., Kulminskii A. A. *Advanced process design solutions for Yakutia kimberlite deposits development*. Ekaterinburg: Uralskii rabochii Publishing; 2022. (In Russ.)

Received 13 February 2024

Information about the authors:

Igor V. Sokolov – DSc (Engineering), full member of the Academy of Mining Sciences, chief researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Director of the Institute of Mining UB RAS. E-mail: direct@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7841-5319>

Igor V. Nikitin – researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining UB RAS. E-mail: opening-kp@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

Для цитирования: Соколов И. В., Никитин И. В. Определение оптимального места расположения автоуклона в карьере при вскрытии подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 2. С. 42–50. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-42-50

For citation: Sokolov I. V., Nikitin I. V. Determining the optimal location for a truck decline in a pit when opening pit reserves at kimberlite deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 2: 42–50 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-42-50