

УДК 622.684:629.3

Лель Юрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
Уральский государственный
горный университет,
620144 г. Екатеринбург,
пер. Университетский, 9
e-mail: lel49@mail.ru

Глебов Игорь Андреевич

младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58;
e-mail: i.glebov@igduran.ru

Буднев Алексей Борисович

инженер-проектировщик,
ГеоТехноген-Проект,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58;
e-mail: gtp.budnevab@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ВСКРЫТИЯ ГЛУБОКИХ
КИМБЕРЛИТОВЫХ КАРЬЕРОВ
КРУТОНАКЛОННЫМИ
АВТОСЪЕЗДАМИ***Аннотация:*

Рассмотрена технологическая схема перехода на крутонаклонное вскрытие с использованием полноприводных шарнирно-сочлененных автосамосвалов при отработке кимберлитовых карьеров. Предложен аналитический метод расчета объема дополнительного разноса бортов карьеров от размещения автотранспортных коммуникаций и углов откоса нерабочих бортов при вскрытии карьеров автосъездами спиральной формы. В результате моделирования установлены закономерности изменения дополнительного разноса бортов от глубины карьера, ширины и уклона автосъездов, а также мощности рудного тела. Разработана методика расчета оптимальной глубины перехода на крутонаклонное вскрытие. Установлено, что эффективность перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами, оцениваемая снижением приведенных затрат на разработку месторождения, зависит от уклона вскрываемых выработок, сокращения объема разноса бортов карьера, мощности рудного тела, себестоимости вскрышных работ, себестоимости транспортирования горной массы полноприводными автосамосвалами и автосамосвалами с колесной формулой 4×2, а также их соотношения. Закономерности изменения приведенных затрат на разработку месторождений в зависимости от глубины перехода на крутонаклонное вскрытие носят экстремальный характер. Оптимальная глубина перехода на крутонаклонное вскрытие характеризуется относительной устойчивостью, составляя 54 – 60 % от проектной глубины карьера. Результаты исследования используются институтом «Якутнипроалмаз» при проектировании отработки карьера «Нюрбинский» до глубины 750 м.

Ключевые слова: карьер, уклон спиральной трассы, разнос бортов, полноприводный автосамосвал, глубина перехода, мощность рудного тела, приведенные затраты.

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.061

Lel Yuriy I.

Doctor of Engineering, Professor,
Ural State Mining University,
620144, Ekaterinburg, 9 University Lane
e-mail: lel49@mail.ru

Glebov Igor A

Junior Researcher,
Institute of Mining of Ural branch of RAS,
620075, Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: i.glebov@igduran.ru

Budnev Alexey B.

Engineer,
Geotechnogen-Project,
620075, Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.;
e-mail: gtp.budnevab@mail.ru

**STUDY OF PARAMETERS OF DEVELOPING
THE DEEP KIMBERLITE OPEN PITS
BY STEEPLY INCLINED AUTOSLOPES***Abstract:*

The paper considers the technological scheme of transition to a steeply inclined opening with the use of four-wheel drive dump trucks during the mining of kimberlite quarries. It proposes analytical method of calculating the amount of additional dressing of pit from the placement of transportation and communications of the angles of slope inoperative boards by the opening of the quarries with spirally shaped autoslopes. As a result of the modeling, the regularities of the change in the additional spacing of the sides depending on the depth of the quarry, the width and the slope of the road ways, as well as the power of the ore body have been established. The technique of the optimal depth of transition to a steeply sloping opening has been developed. It is noted that the efficiency of the transition to the developing by steeply inclined driveways, estimated at reducing the above costs for the development of the field, depends on the slope of the opening workings, on reducing the volume of separation of the sides of the quarry, on the power of the ore body, on the cost of stripping and the cost of transportation of rock mass by full-drive dump trucks and dump trucks with a wheel formula 4×2, as well as their ratio. The regularities of the changes in the given costs for the development of deposits depending on the depth of the transition to the steeply inclined opening is extreme. The optimal depth of the transition to a steeply sloping opening is characterized by relative stability, amounting to 54-60% of the design depth of the quarry. The results of the study have their implementation by the Institute "Yakutnioproalmaz" at pro-design pit "Nyurbinsky" to a depth of 750 m.

Keywords: quarry, slope of the spiral road, sides spacing, four-wheel drive dump truck, the depth of the transition, power of the ore body, given costs.

Увеличение потенциала открытых горных работ возможно за счет внедрения новых технологических решений по вскрытию и отработке месторождений, современного горно-транспортного оборудования с новыми техническими возможностями и роботизации основных технологических процессов [1 – 3].

Одним из таких технологических решений при отработке кимберлитовых карьеров является переход с определенной глубины на вскрытие крутонаклонными автосъездами при использовании полноприводных шарнирно-сочлененных автосамосвалов (ШСС), а также на вскрытие законтурными автомобильными тоннелями спиральной формы [4].

Основные преимущества шарнирно-сочлененных автосамосвалов заключаются в использовании крутонаклонных съездов (i до 25... 30 %) и транспортных берм меньшей ширины по сравнению с автосамосвалами с колесной формулой 4×2, что позволяет увеличить углы наклона нерабочих бортов карьера, сократить дополнительный объем вскрыши от размещения транспортных коммуникаций и повысить экономические показатели открытого способа разработки. Технологическая схема перехода на крутонаклонное вскрытие представлена на рис. 1. Нерабочий борт карьера отстраивается по линии ECO , причем верхняя часть нерабочего борта карьера отстраивается под углом γ_1 , соответствующим применению автосамосвалов с колесной формулой 4×2 и уклону автосъездов i_1 , а нижняя часть CO – под углом γ_2 , соответствующим применению полноприводных автосамосвалов и уклону автосъездов i_2 ($i_2 > i_1$).

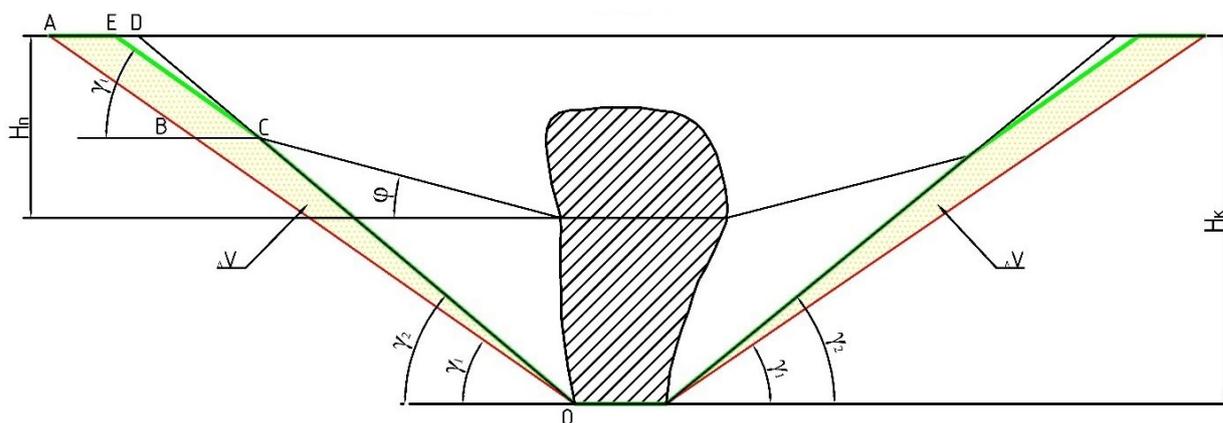


Рис. 1 – Технологическая схема перехода на крутонаклонное вскрытие:

H_k – конечная (проектная) глубина карьера;

γ_2, γ_1 – углы откоса нерабочего борта, соответственно, при уклоне вскрывающих выработок i_2 и i_1 ($i_2 > i_1$);

H_n – глубина перехода на крутонаклонное вскрытие;

ϕ – угол откоса рабочего борта карьера;

ΔV – сокращение объема разноса бортов карьера от размещения транспортных коммуникаций

При определении оптимальной глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами важное значение имеет расчет дополнительного разноса нерабочих бортов карьера от размещения транспортных коммуникаций. Обычно на практике строятся объемные модели карьеров в таких системах, как AutoCAD или MINEFRAME, с различным уклоном вскрывающих выработок, рассчитываются объемы вскрыши в конечных контурах карьера и производится сравнение этих объемов [5]. Однако такой метод является весьма трудоемким для установления основных закономерностей перехода на крутонаклонное вскрытие. В этом случае лучше использовать аналитические методы расчета. Анализ современных методов расчета дополнительного разноса бортов от размещения автотранспортных коммуникаций показывает, что наиболее приемлемым для горнотехнических условий кимберлитовых карьеров при вскрытии крутопадающих рудных тел

округлой формы спиральными автосъездами является аналитический метод, разработанный в Криворожском горнорудном институте [6]. Дополнительный объем разноса бортов от размещения автотранспортных коммуникаций (V , м³) при спиральной форме трассы определяется по формуле

$$V = \frac{BH_k^2}{2i} K_T, \quad (1)$$

где B – ширина транспортной бермы, м; H_k – глубина карьера, м; i – уклон спиральной трассы, доли ед.; K_T – коэффициент, учитывающий дополнительное увеличение объема горных работ, обусловленное необходимостью разноса бортов карьера для размещения системы спиральных съездов при вскрытии новых горизонтов, ед.:

$$K_T = \frac{[(H_k + r_0 \operatorname{tg} \gamma)^2 + (H_k + r_0 \operatorname{tg} \gamma)B \operatorname{tg} \gamma] \ln \left(1 + \frac{H_k}{r_0 \operatorname{tg} \gamma}\right) - \frac{H_k^2}{2} - H_k \operatorname{tg} \gamma (r_0 + B)}{H_k^2}, \quad (2)$$

где r_0 – радиус дна карьера, м; γ – среднее значение угла откоса нерабочих бортов карьера, град.

Основным недостатком рассматриваемого метода является то, что в формуле (2) используется уже известное значение угла откоса нерабочего борта (γ). В то же время угол γ определяется конструкцией нерабочего борта и зависит от уклона спиральной трассы (i), ширины транспортной бермы (B), количества витков спиральной трассы (n_b), высоты уступа (h_y) и других факторов. Угол откоса нерабочего борта является также контролируемым параметром и не должен превышать значения, установленного по условиям устойчивости. При этом учитываются следующие физико-механические свойства горных пород: плотность, угол внутреннего трения, сцепление в образце и коэффициент структурного ослабления в массиве. Среднее значение конструктивного угла нерабочего борта карьера определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{H_k}{\left(\frac{H_k}{h_y} - 1\right) b_0 + n_b B + H_k \operatorname{ctg} \alpha} \quad (3)$$

где h_y – высота нерабочего уступа, м; b_0 – ширина бермы безопасности, м; n_b – среднее количество витков спиральной трассы; α – угол откоса нерабочего уступа, град.

В свою очередь, согласно [6],

$$n_b \approx \frac{\operatorname{tg} \gamma}{2\pi i} \ln \left(1 + \frac{H_k}{r_0 \operatorname{tg} \gamma}\right). \quad (4)$$

Подставив выражение (4) в формулу (3) и обозначив $x = \operatorname{tg} \gamma$; $a = B/2\pi i$; $c = (H_k/h_y - 1)b_0 + H_k \operatorname{ctg} \alpha$; $d = H_k$, получим уравнение

$$ax^2 \ln \left(1 + \frac{b}{x}\right) + cx - d = 0. \quad (5)$$

После преобразования получим

$$\left(1 + \frac{b}{x}\right)^{ax^2} = e^{d-cx}. \quad (6)$$

Данное уравнение решается графически путем нахождения точки пересечения графиков двух функций

$$\begin{cases} f(x) = \left(1 + \frac{b}{x}\right)^{ax^2} \\ f(x) = e^{d-cx} \end{cases}; \quad (7)$$

Таким образом, задавая исходные данные $H_k, h_y, B, i, r_o, \alpha$, графически определяя $\text{tg}\gamma$, находится значение K_T и объем дополнительного разнора бортов карьера (V) по формулам (1), (2). Пример определения тангенса угла нерабочего борта карьера ($\text{tg}\gamma$) приведен на рис. 2. Исходные данные: $H_k = 450$ м, $h_y = 30$ м, $b_6 = 10$ м, $B_T = 30$ м, $i = 0,08$, $r_o = 100$ м, $\alpha = 75^\circ$. Получаем $\text{tg}\gamma = 1,21$ или $\gamma = 50,4^\circ$.

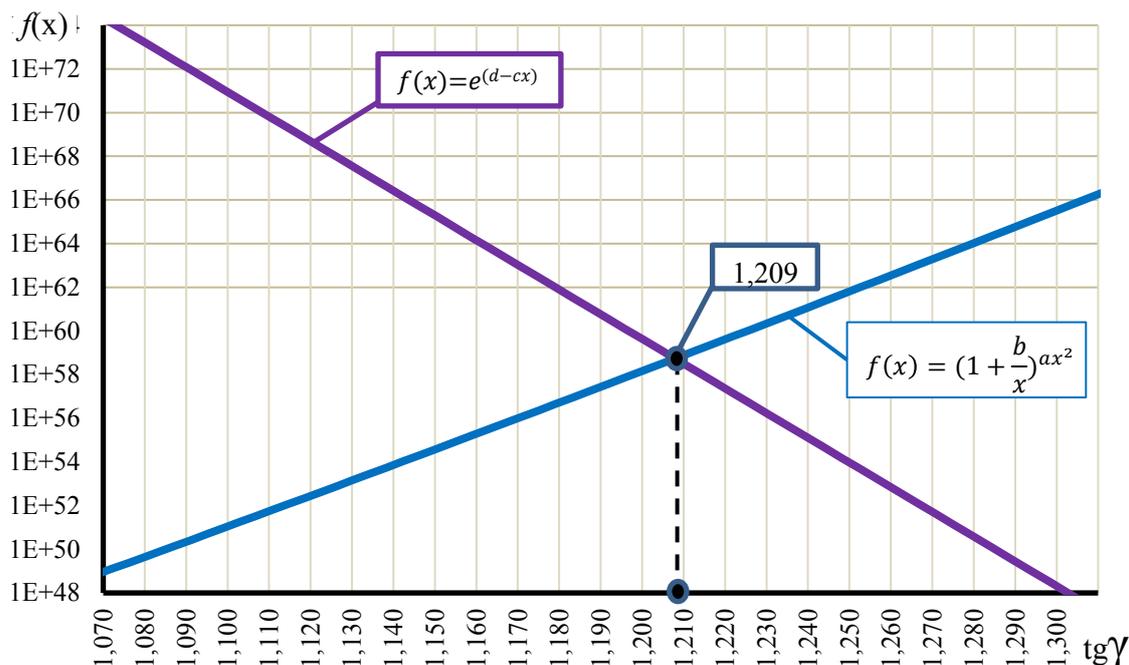


Рис. 2 – Пример определения тангенса угла нерабочего борта карьера ($\text{tg}\gamma$)

Оптимальная глубина перехода на крутонаклонное вскрытие определялась методом экономико-математического моделирования на примере гипотетического карьера с горнотехническими условиями, максимально приближенными к условиям кимберлитовых карьеров АК «АЛРОСА» (ПАО). Исходные параметры для моделирования представлены в табл. 1. Методика базируется на теоретических положениях переходных процессов, сформулированных член-корр. РАН В.Л. Яковлевым [7].

Диапазон изменения радиуса для карьера (мощности рудного тела) был принят по реальным параметрам карьеров, разрабатываемых АК «АЛРОСА» (ПАО). В результате моделирования установлено, что наибольшее влияние на объем дополнительного разнора бортов карьера от размещения транспортных коммуникаций оказывает ширина и уклон автосъездов (рис. 3). Ввиду ограниченной грузоподъемности полноприводных автосамосвалов (до 40 – 45 т) основное влияние на объем дополнительного разнора будет оказывать уклон спиральных автосъездов. При увеличении мощности рудного тела от 100 до 400 м влияние уклона снижается, что объясняется сокращением количества витков спиральной трассы. Так, при уклоне 8 % и глубине карьера 700 м при увеличении мощности рудного тела со 100 до 400 м объем дополнительного разнора бортов сокращается с 339,8 до 223,1 млн м³ (на 106,7 млн м³), а при уклоне автосъездов 30 % объем

сокращается на 20,6 млн м³, т. е. в 5 раз меньше. Таким образом, эффективность крутонаклонного вскрытия также снижается с увеличением мощности рудного тела, что подтверждается экономическими расчетами.

Таблица 1

Исходные параметры для моделирования

Параметры	Значения
<i>Постоянные параметры</i>	
Конечная глубина карьера H_k , м	700
Высота нерабочего уступа h_y , м	30
Уклон откоса нерабочего уступа α , град.	65
Модели и грузоподъемность автосамосвалов, т: в зоне традиционной схемы вскрытия в зоне крутонаклонного вскрытия	CAT-777D (91 т) CAT-745C (41 т)
Ширина транспортных берм (B , м) для автосамосвалов: CAT-777D CAT-745C	27,1 10,1
Уклон спиральных автосъездов при эксплуатации CAT-777D i , доли ед.	0,08
Угол откоса рабочего борта карьера φ , град.	21,8
Скорость углубки карьера h_r , м/год	25
Плотность руды γ_r , т/м ³	2,2
Плотность вскрыши γ_v , т/м ³	2,5
<i>Варьируемые параметры</i>	
Уклон спиральных автосъездов при эксплуатации CAT-745C i , доли ед.	0,12/0,20/0,30
Диаметр дна карьера (мощность рудного тела) M , м	100/250/400
Глубина перехода на крутонаклонное вскрытие H_p , м	250/300/400/500/600
<i>Экономические данные</i>	
Себестоимость: вскрыши в базовом году C_v , руб/м ³	343
транспортирования автосамосвалами CAT-777D в базовом году C_{a1} , руб/ткм	17,6
транспортирования полноприводными автосамосвалами CAT-745C в базовом году для уклонов 0,12/0,20/0,30 C_{a2} , руб/ткм	22,4/26,9/29,6
перегрузки горной массы C_p , руб/м ³	40
Балансовая стоимость автосамосвалов K , млн. руб.: CAT-777D CAT-745C	38,5 32,0

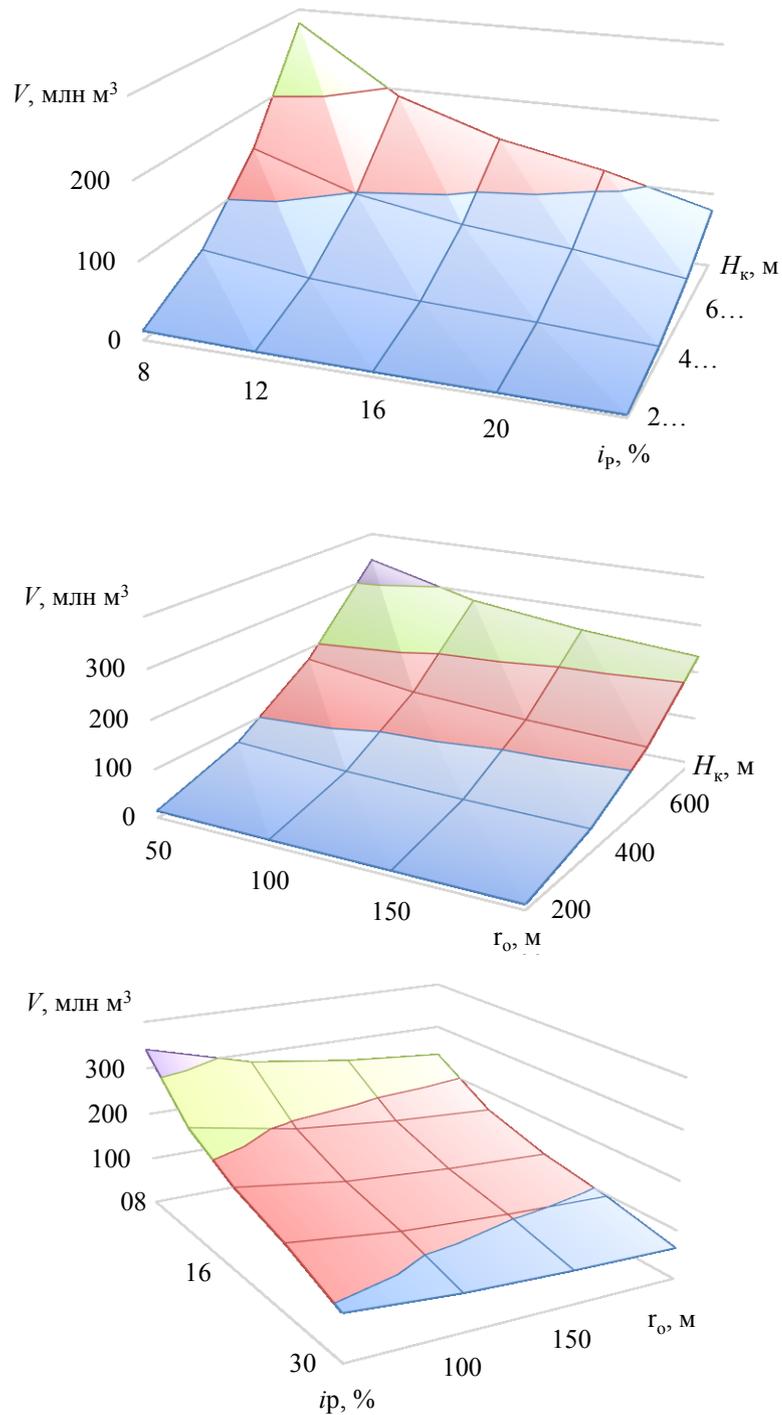


Рис. 3 – Закономерности изменения объема дополнительного разноса борта карьера (V) от руководящего уклона спиральной трассы (i), глубины карьера (H_k) и радиуса дна (r_0)

Критерий выбора оптимальной глубины перехода на крутонаклонное вскрытие можно записать следующим образом [8]:

$$Z = \sum_{t=0}^T (\mathcal{E}_t + K_t) \frac{1}{(1 + E)^t} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где Z – сумма приведенных затрат за период оптимизации, млн руб.; T – горизонт расчета (срок эксплуатации карьера), лет.

$$T = t_3 - t_{п}, \quad (9)$$

t_3 – год, в котором осуществляются затраты; t_n – год, в котором приводятся затраты; \mathcal{E}_t – эксплуатационные затраты по варианту на t -ом шаге расчета, млн руб.; K_t – капитальные затраты на t -ом шаге расчета, млн руб.; E – норма дисконта, доля ед. ($E = 0,11$).

При расчете эксплуатационных затрат учитываются только те затраты, которыми отличаются рассматриваемые варианты перехода. К таким затратам следует отнести эксплуатационные затраты на выемку вскрышных пород, поскольку варианты отличаются объемами вскрыши, и эксплуатационные затраты на транспортирование горной массы автосамосвалами. Следует отметить, что при внедрении полноприводных автосамосвалов происходит изменение затрат в смежных технологических процессах (экскавация, строительство и содержание автодорог и др.). Вместе с тем, как показывает анализ, эти изменения находят в пределах точности оценки, и для задачи определения оптимальной глубины перехода ими можно пренебречь.

$$\mathcal{E}_t = \mathcal{E}_{Bt} + \mathcal{E}_{Tt}, \quad (10)$$

где \mathcal{E}_{Bt} – эксплуатационные затраты на выемку вскрыши по рассматриваемому варианту на t -ом шаге расчета, млн руб.; \mathcal{E}_{Tt} – эксплуатационные затраты на автотранспорт по рассматриваемому варианту на t -ом шаге расчета (в t -ом году), млн руб.

Эксплуатационные затраты на выемку вскрыши в t -ом году по рассматриваемому варианту перехода

$$\mathcal{E}_{Bt} = C_B k_B V_{Bt}, \quad (11)$$

где C_B – себестоимость вскрыши в базовом (2018 г.) году за исключением эксплуатационных затрат на автотранспорт, руб/м³ (см. табл. 1); k_B – коэффициент, учитывающий влияние глубины карьера на увеличение себестоимости вскрыши по отношению к базовому варианту [8]; V_{Bt} – объем выемки вскрыши в t -ом году по рассматриваемому варианту перехода на крутонаклонное вскрытие, м³.

Эксплуатационные затраты на автомобильный транспорт в t -ом году по рассматриваемому варианту перехода

$$\mathcal{E}_{Tt} = C_a k_a Q_{Tt}, \quad (12)$$

где C_a – себестоимость транспортирования горной массы принятой моделью автосамосвала в базовом году, руб/ткм; k_a – коэффициент, учитывающий влияние изменения горнотехнических условий эксплуатации автотранспорта в t -ом году на себестоимость транспортирования по отношению к базовому варианту; Q_{Tt} – грузооборот автотранспорта в t -ом году, ткм.

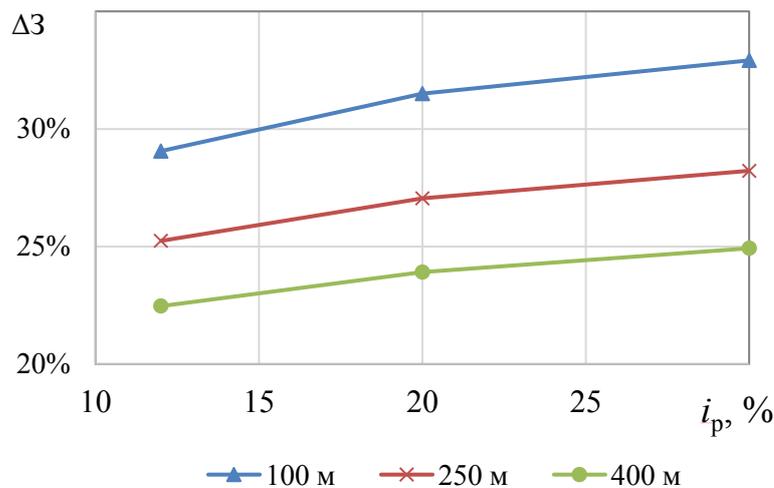
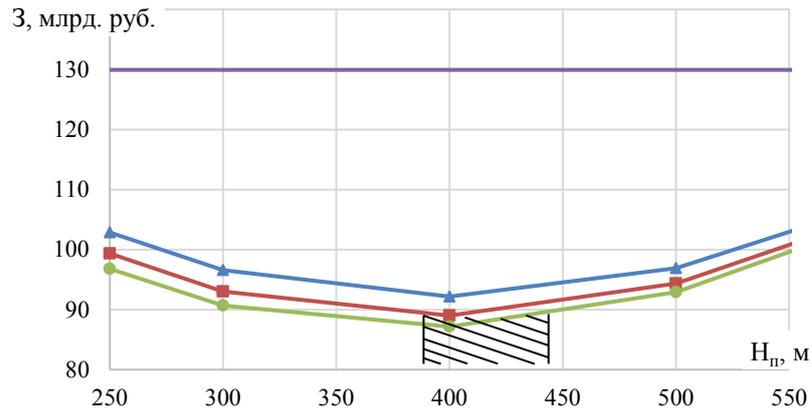
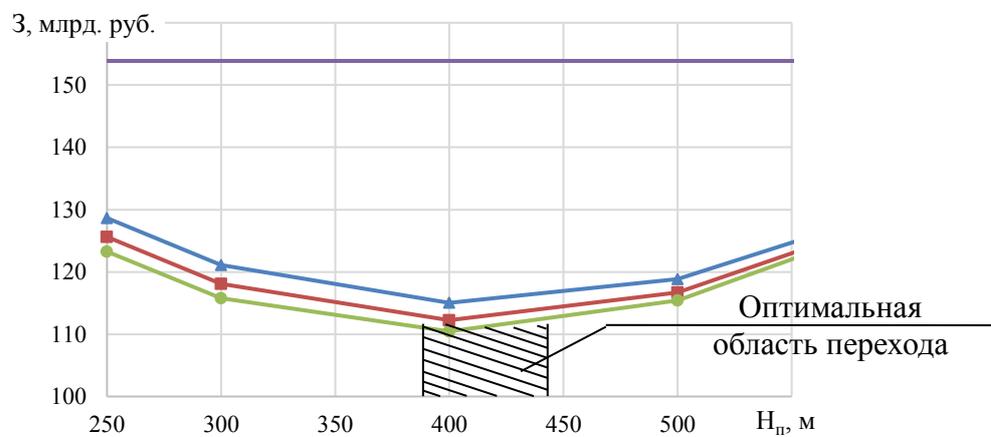


Рис. 4 – Зависимость сокращения приведенных затрат на разработку (ΔZ) от руководящего уклона вскрывающих выработок (i_p) и мощности рудного тела (100, 250 и 400 м, соответственно) при внедрении крутонаклонного вскрытия

а



б



в

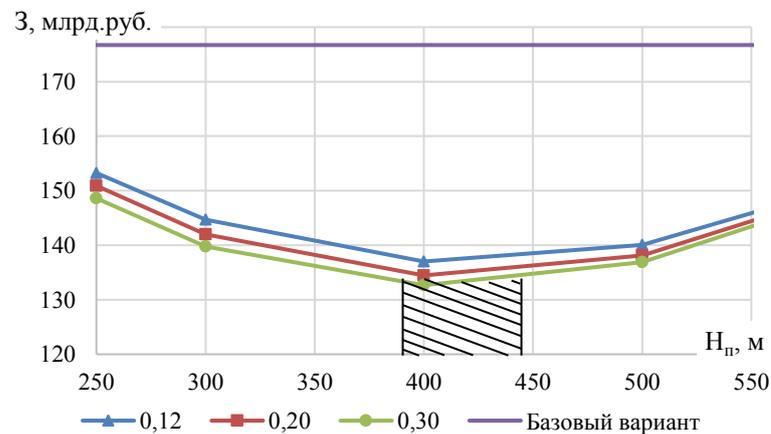


Рис. 5 – Закономерности изменения приведенных затрат на разработку (Z) от глубины перехода на крутонаклонное вскрытие при мощности рудного тела:

а – 100 м; б – 250 м; в – 400 м

При расчете капитальных затрат (K_T) учитывали затраты на приобретение автосамосвалов различных моделей с учетом изменения грузооборота автотранспорта.

Установлено, что эффективность перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами, оцениваемая снижением приведенных затрат на разработку месторождения, зависит от уклона вскрывающих выработок, сокращения объема разноса бортов карьера, мощности рудного тела, себестоимости вскрышных работ, себестоимости транспорти-

рования горной массы полноприводными автосамосвалами и автосамосвалами с колесной формулой 4×2, а также их соотношения. На рис. 4 представлены закономерности снижения приведенных затрат на разработку по сравнению с базовым вариантом от уклона вскрывающих выработок и мощности рудного тела при переходе на крутонаклонное вскрытие.

За базовый принят вариант разработки карьера глубиной 700 м автосамосвалами САТ-777D (91 т) при уклоне вскрывающих выработок 8 % (см. табл. 1). При внедрении полноприводных автосамосвалов и увеличении уклона с 12 до 30 % при мощности рудного тела 100 м затраты сокращаются на 30 – 33 %, а при мощности рудного тела 400 м сокращение составит 22 – 25 %. Таким образом, в первую очередь внедрение крутонаклонного вскрытия рекомендуется на кимберлитовых карьерах при разработке рудных тел небольшой мощности.

На рис. 5 представлены закономерности изменения приведенных затрат на разработку месторождения в зависимости от глубины перехода на крутонаклонное вскрытие.

Установлено, что эти закономерности носят экстремальный характер. При конечной глубине карьера 700 м оптимальная область перехода находится в пределах 375 – 425 м. Оптимальная область имеет достаточно устойчивый характер, составляя 54 – 60 % от проектной глубины карьера. Это подтверждается результатами моделирования при изменении конечной глубины карьера. В свою очередь, оптимальная область перехода, как видно из рис. 5, практически не зависит от уклона вскрывающих выработок и мощности рудного тела. Установленные зависимости полностью согласуются с одним из важнейших принципов физики – принципом Ле Шателье – Брауна, описывающем поведение физических и технико-экономических систем, находящихся в устойчивом равновесии. Смещение оптимальной глубины перехода в большую сторону будет наблюдаться при увеличении себестоимости транспортирования горной массы полноприводными автосамосвалами, а в меньшую – при ее снижении или увеличении себестоимости вскрышных работ. Результаты исследования используются институтом «Якутнипроалмаз» при проектировании отработки карьера «Нюрбинский» до глубины 750 м.

Литература

1. Комплексные исследования и внедрение инновационных геотехнологий добычи и глубокой переработки кимберлитов / В.А. Чантурия, К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов и др. // Горный журнал. – 2011. – № 1. – С. 10 - 13.
2. Технологические решения по вскрытию и отработке глубоких горизонтов Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» / А.Н. Акишев, Ю.И. Лель, Д.Х. Ильбульдин, О.В. Мусихина, И.А. Глебов // Известия вузов. Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 4 - 12.
3. Инновационная технология открытой разработки кимберлитовых месторождений с измененной геометрией нерабочих бортов / А.Н. Акишев, Ю.И. Лель, И.Б. Бокий, С.В. Исаков, И.А. Глебов // Известия вузов. Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 5 - 16.
4. Зырянов И.В. Испытания САТ-740В на крутонаклонных съездах карьера «Удачный» АК «АЛРОСА» / И.В. Зырянов, А.И. Цымбалова // Горное оборудование и электромеханика. - 2013. - № 9. - С. 22 - 25.
5. Журавлев А.Г. Влияние типоразмера автосамосвала на разнос бортов карьера / А.Г. Журавлев, А.Б. Буднев // Проблемы недропользования. – 2018. – № 2. – С. 20 - 29. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.02.020
6. Вилкул Ю.Г. Теоретические основы определения объемов горнокапитальных работ при вскрытии глубоких карьеров трассами спиральной формы / Ю.Г. Вилкул, В.К. Слободянюк, И.И. Максимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 7. – С. 17 - 23.



7. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений / В.Л. Яковлев, И.В. Соколов, Г.Г. Саканцев, И.Л. Кравчук // Горный журнал. - 2017. - № 7. - С. 46 – 50.

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