ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГОРНЫЕ МАШИНЫ

УДК 622.271:622.684:622.268 DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-8-19

Оценка эффективности и глубины перехода на инновационные схемы вскрытия при разработке кимберлитовых карьеров

Коваленко В. С.[1]*, Лель Ю. И.[2], Глебов И. А.[2], Исаков С. В.[2]
[1] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, г. Москва, Россия
[2] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: kovalenko_v@ipkonran.ru

Реферат

Цель работы *– разработка методики оценки эффективности и глубины перехода на инновационные схемы вскрытия, обеспечивающие сокращение объемов вскрышных работ и расширение области применения открытого способа разработки алмазорудных месторождений.*

Актуальность исследований. *Разработка кимберлитовых карьеров характеризуется постоянным увеличением сложности и трудоемкости транспортирования горной массы при сохранении существующего вида транспорта (автомобильного) и сопровождается увеличением затрат на добычу полезного ископаемого. Одним из технологических решений по повышению эффективности отработки кимберлитовых карьеров является переход с определенной глубины на инновационные схемы вскрытия, подразумевающие крутонаклонные автосъезды и законтурные тоннели спиральной формы (при использовании полноприводных автосамосвалов). Это позволит увеличить углы наклона нерабочих бортов карьеров, сократить дополнительный объем вскрышных работ от размещения вскрывающих выработок и затраты на разработку, отработать карьеры до глубины 700–750 м.*

Методология проведения исследований. *Разработана методика обоснования эффективности и глубины перехода на инновационные схемы вскрытия кимберлитовых карьеров, базирующаяся на экономико-математическом моделировании и включающая: учет изменения затрат на технологический автотранспорт в зависимости от модели автосамосвала и величины уклона автосъездов в динамике развития карьера; учет дополнительного разноса бортов карьера от размещения автотранспортных коммуникаций; дифференцированный учет влияния горнотехнических условий разработки на показатели автотранспорта и себестоимость вскрышных работ; учет капитальных вложений и эксплуатационных затрат на строительство и содержание подземных выработок при тоннельном вскрытии.*

Результаты. *Установлено, что внедрение комбинированной схемы вскрытия с использованием крутонаклонных автосъездов и законтурного автомобильного тоннеля спиральной формы при разработке Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» (ПАО) позволит сократить средний эксплуатационный коэффициент вскрыши в 8 раз (с 37,7 до 4,7 м^3/т) по сравнению с традиционной схемой вскрытия, доработать карьер до глубины 750 м, соответствующей глубине разведанных запасов, с ожидаемым экономическим эффектом 13,7 млрд руб.*

Область применения результатов. *Предлагаемые инновационные схемы вскрытия могут найти применение не только при разработке кимберлитовых карьеров, но также при открытой разработке руд цветных и благородных металлов, представленных крутопадающими залежами округлой формы.*

Ключевые слова: *карьер; уклон автосъезда; угол откоса борта карьера; полноприводный автосамосвал; мощность рудного тела; капитальные вложения; эксплуатационные затраты; сумма приведенных затрат на разработку; глубина перехода; инновационная схема вскрытия.*

Введение. В последние годы прослеживается тенденция отхода от традиционного открыто-подземного способа разработки коренных месторождений алмазов, расположенных в криолитозоне. Это связано с увеличением потенциала открытых горных работ за счет внедрения новых технологических решений по вскрытию и отработке месторождений, современного горно-транспортного оборудования с новыми техническими возможностями и роботизации основных технологических процессов. Если раньше переход на подземную разработку планировался с глубины 500–600 м, то в настоящее время потенциал открытых горных работ позволяет эффективно разрабатывать карьеры до глубины 850–1000 м. Это обстоятельство делает возможным пересмотреть концепцию отработки коренных месторождений алмазов и в ряде случаев отказаться от дорогостоящего подземного способа отработки подкарьерных запасов [1–6].

Институтом «Якутнипроалмаз» и Уральским государственным горным университетом рассмотрен вариант перехода на инновационные схемы вскрытия с использованием крутонаклонных автосъездов и законтурных тоннелей спиральной формы, что позволяет расширить область применения открытого способа разработки кимберлитовых карьеров. Вариант реализован в инновационном проекте доработки Нюрбинского карьера до глубины 750 м (*Инновационный проект «Развитие технологии открытой разработки алмазорудных месторождений (на примере доработки запасов руды тр. «Нюрбинская»): отчет о НИР / Якутнипроалмаз. Рук. Акишев А. Н., Мирный, 2017. 20 с.*). Статья посвящена теоретическому обоснованию основных технологических решений этого проекта.

Методика проведения исследований и результаты. Эффективность и оптимальная глубина перехода на инновационные схемы вскрытия определяются экономико-математическим моделированием на примере гипотетического карьера с горнотехническими условиями, максимально приближенными к условиям кимберлитовых карьеров. Исходные данные для моделирования скомпонованы из показателей инновационного проекта доработки Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» (ПАО).

Исходные данные для экономико-математического моделирования

Конечная глубина карьера $H_к$, м	750
Высота нерабочего уступа $h_у$, м:	
– в зоне традиционной схемы вскрытия и вскрытия крутонаклонными автосъездами	30
– в зоне вскрытия законтурным тоннелем	45
Угол откоса нерабочих уступов α, град.	65–75
Модели и грузоподъемность автосамосвалов:	
– в зоне традиционной схемы вскрытия	CAT-777D (91 т)
– в зоне вскрытия крутонаклонными автосъездами и тоннелем	CAT-745C (41 т)
Ширина транспортных берм для автосамосвалов B, м:	
– CAT-777D	27,1
– CAT-745C	14,7
Уклон автосъездов i, доли ед.:	
– CAT-777D	0,08
– CAT-745C	0,16 / 0,20 / 0,24*
Уклон тоннеля $i_т$, доли ед.	0,20
Угол откоса рабочего борта карьера φ, град.	16,7
Скорость углубки карьера $h_г$, м/год	25
Плотность руды $\gamma_р$, т/м^3	2,2

Плотность вскрыши $\gamma_в$, т/м^3 2,5
Мощность рудного тела (диаметр дна карьера) М, м 50–350*
Себестоимость в базовом году, руб./м^3:
– выемки вскрыши $C_в$ 113,5
– перегрузки горной массы $C_{пер}$ 40
Стоимость самосвалов в базовом году Ц$_а$, млн руб.:
– CAT-777D 77,5
– CAT-745C 68,5
* Варьируемые параметры.

В качестве критерия оценки эффективности и выбора оптимальной глубины перехода на новую схему вскрытия используется сумма приведенных (дисконтированных) затрат, включающих капитальные затраты на приобретение автосамосвалов К$_т$, горнокапитальные работы по проходке тоннеля К$_{гкр}$ и вентиляционных выработок К$_{вент}$, эксплуатационные затраты на транспортирование горной массы Э$_т$, вскрышные работы Э$_в$, перегрузку горной массы Э$_{пер}$, содержание подземных выработок Э$_п$ [7–9], (*Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования: утв. Госстроем России, Министерство экономики, Министерством финансов РФ, Госпланом России, № 7-12/47 от 31.03. 94 г. М., 1994. 80 с.*):

$$З = \sum_{t=0}^{t} (Э_t + К_t) \frac{1}{(1+E)^t} \to \min,$$

где З – сумма приведенных затрат за период оптимизации, млн руб.; $Э_t$ – эксплуатационные затраты по варианту на t-ом шаге расчета, млн руб.; $К_t$ – капитальные затраты на t-ом шаге расчета, млн руб.; E – норма дисконта, доли ед., E = 0,11; t – горизонт расчета (длительность оцениваемого периода), лет;

$$t = t_з - t_п,$$

$t_з$ – год, в котором осуществляются затраты; $t_п$ – год, к которому приводятся затраты (2024 г.).

В верхней зоне кимберлитовых карьеров (130–150 м), сложенной слабыми покрывающими породами, углы откосов нерабочих бортов лимитируются условиями устойчивости и составляют не более 35°–38° [10], (*Изучить физико-механические свойства вмещающих пород в окрестностях карьера на трубке «Нюрбинская» по инженерно-геологическим скважинам до глубины абс. отм. –400 м: отчет о НИР / Якутнипроалмаз. Рук. Бокий И. Б. Мирный, 2014. 28 с.*). В указанной зоне целесообразно использовать автосамосвалы с колесной формулой 4 × 2 (CAT-777D) и уклоны автосъездов 8 %. Переход на вскрытие крутонаклонными автосъездами рассматривается с глубины 150 м, где устойчивый угол нерабочего борта составляет 50,0°–51,6°. Применение полноприводных автосамосвалов в этой зоне позволяет увеличить конструктивный угол нерабочего борта, максимально приблизив его значение к устойчивому углу, и сократить объемы вскрышных работ [11]. Зависимость величины конструктивного угла нерабочего борта от уклона автосъезда и мощности рудного тела представлена на рис. 1.

При увеличении глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами происходит изменение капитальных и эксплуатационных затрат на разработку. Это связано с изменением объемов вскрышных работ, затрат на транспортирование и перегрузку горной массы. Разработанная методика позволяет установить такую глубину перехода, при которой суммарные дисконтированные затраты на разработку будут минимальными.

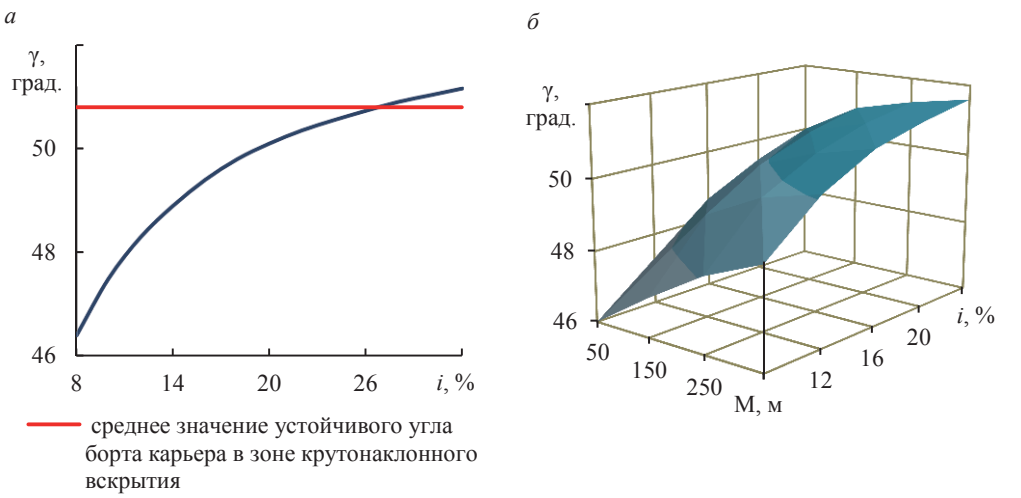

Рисунок 1. Зависимость величины конструктивного угла нерабочего борта карьера γ в зоне крутонаклонного вскрытия (автосамосвалы CAT-745C, $h_у$ = 30 м, М = 100 м): *а* – от уклона автосъезда *i*; *б* – от мощности рудного тела М и уклона автосъезда *i*

Figure 1. Dependence of the overall angle of the non-working pit wall γ in the steeply inclined overburden removal zone (CAT-745C haul trucks, $h_у$ = 30 m, M = 100 m): *a* – on the haul ramp slope *i*; *б* – on the ore body thickness M and the haul ramp slope *i*

На первом этапе реализации методики глубина перехода изменялась от 150 до 660 м с шагом, равным высоте нерабочего уступа, $h_у$ = 30 м. При каждом изменении глубины перехода производился перерасчет указанных экономических показателей.

Эксплуатационные затраты на выемку вскрыши при рассматриваемой глубине перехода в *t*-ом году определяются по формуле

$$Э_{вt} = С_в k_в V_{вt},$$

где $С_в$ – себестоимость вскрыши в базовом году за исключением эксплуатационных затрат на автотранспорт, руб./м^3; $k_в$ – коэффициент, учитывающий влияние глубины карьера на себестоимость вскрыши по отношению к базовому варианту; $V_{вt}$ – объем выемки вскрыши при рассматриваемой глубине перехода, м^3.

Эксплуатационные затраты на автомобильный транспорт в *t*-ом году при рассматриваемой глубине перехода определяются по формуле

$$Э_{тt} = С_а k_а Q_{тt},$$

где $С_а$ – себестоимость транспортирования горной массы рассматриваемой моделью автосамосвала в базовом году, руб./т · км; $Q_{тt}$ – грузооборот автотранспорта в *t*-ом году, т · км; $k_а$ – коэффициент, учитывающий влияние изменения горнотехни-

ческих условий эксплуатации в *t*-ом году на себестоимость автоперевозок по отношению к базовому варианту. Значения коэффициентов $k_а$ и $k_в$, полученные на основе исследований ИГД УрО РАН и УГГУ, представлены в табл. 1.

Грузооборот автотранспорта в *t*-ом году определяется по формуле

$$Q_{Tt} = \left(V_{вt}\gamma_в + V_{pt}\right)L_t,$$

где $V_{вt}$ – объем вскрыши в *t*-ом году при рассматриваемой глубине перехода, м^3; $\gamma_в$ – средняя плотность вскрыши, т/м^3; V_{pt} – объем добычи руды в *t*-ом году, т; L_t – расстояние транспортирования в *t*-ом году, км.

Таблица 1. Значения коэффициентов, учитывающих влияние глубины карьера на себестоимость вскрышных работ и автоперевозок

Table 1. Values of coefficients accounting for the open-pit depth effect on the cost of overburden removal and the cost of truck haulage

Коэффициент	Значения при глубине, м						
	150	250	350	450	550	650	750
$k_в$	1,09	1,72	2,41	3,09	3,78	4,46	5,14
$k_а$	1,00	1,24	1,28	1,32	1,36	1,41	1,45

Эксплуатационные затраты на перегрузку горной массы в *t*-ом году при рассматриваемой глубине перехода:

$$Э_{перt} = С_{пер}V_{гм.перt},$$

где $С_{пер}$ – себестоимость перегрузки горной массы в базовом году, руб./м^3; $V_{гм.перt}$ – объем горной массы, перевозимой полноприводными автосамосвалами и подлежащей перегрузке в *t*-ом году, м^3.

Моделированием установлено, что эксплуатационные затраты на выемку вскрыши растут с увеличением глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами (рис. 2, *а*). Это обусловлено уменьшением конструктивного угла нерабочих бортов карьера с ростом объемов вскрышных работ. Более сложную динамику имеют эксплуатационные затраты на транспортирование горной массы автосамосвалов. С увеличением глубины перехода они снижаются, так как увеличивается доля грузооборота, приходящаяся на автосамосвалы с колесной формулой 4 × 2 (CAT-777D), имеющие более низкую себестоимость транспортирования по сравнению с полноприводными автосамосвалами. С другой стороны, затраты имеют тенденцию к увеличению, поскольку с ростом глубины перехода увеличиваются объемы выемки и транспортирования вскрыши. Поэтому зависимость эксплуатационных затрат на транспортирование горной массы от глубины перехода имеет экстремальный характер [12–16].

Капитальные затраты на приобретение автосамосвалов $К_т$ определялись исходя из их потребного количества, сроков службы и эксплуатации карьера. С увеличением глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами они имеют тенденцию к снижению, что объясняется высокой удельной стоимостью полноприводных автосамосвалов CAT-745C по сравнению с автосамосвалами с колесной формулой 4 × 2 (рис. 2, *б*).

На рис. 3 представлена блок-схема методики определения оптимальной глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами и тоннелем спиральной формы.

Зависимость изменения приведенных затрат на разработку от глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами и уклона автосъезда, полученная в результате моделирования, приведена на рис. 4.

Установлено, что оптимальная глубина перехода с уклона 8 % на уклоны 16–24 % составляет 425–500 м (57–67 % от конечной глубины карьера). При этом приведенные затраты на разработку сокращаются с 118 до 84–88 млн руб., т. е. на 34–40 %.

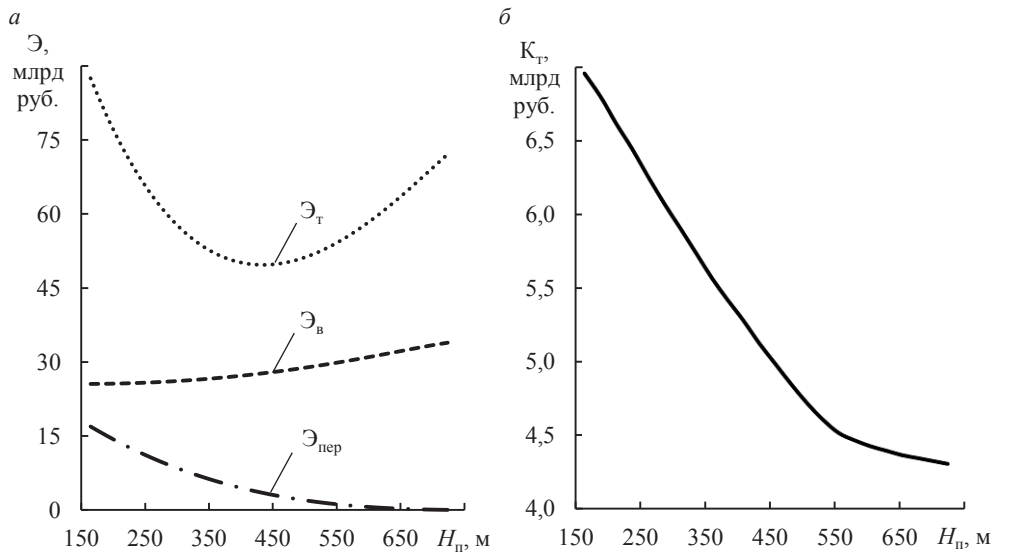

Рисунок 2. Зависимости эксплуатационных затрат Э и капитальных вложений $К_т$ на разработку от глубины перехода $H_п$ на вскрытие крутонаклонными автосъездами (i = 0,24, М = 100 м): *а* – эксплуатационные затраты; *б* – капитальные затраты; $Э_т$ – эксплуатационные затраты на автотранспорт; $Э_в$ – эксплуатационные затраты на вскрышные работы; $Э_{пер}$ – эксплуатационные затраты на перегрузку горной массы

Figure 2. Dependence of operating costs Э and capital investment $К_т$ for mining on the depth $H_п$ of switching to steeply inclined haul ramps (i = 0.24, М = 100 m): *а* – operating costs; *б* – capital costs; $Э_т$ – transport operating costs; $Э_в$ – overburden removal operating costs; $Э_{пер}$ – rock mass rehandling operating costs

Эффективность и оптимальная глубина перехода возрастают с увеличением уклона автосъездов, что полностью согласуется с одним из важнейших принципов физики – принципом Ле Шателье–Брауна, описывающим поведение физических систем, находящихся в устойчивом равновесии [17].

Мощность рудного тела не оказывает существенного влияния на величину оптимальной глубины перехода, при этом от нее зависит экономическая эффективность перехода: она резко снижается с увеличением мощности рудного тела. При М ≥ 700 разница приведенных затрат между вариантами вскрытия приближается к нулю.

На втором этапе реализации методики определяется оптимальная глубина перехода на тоннельное вскрытие $H_{п2}$. Для этого оптимальная глубина перехода на крутонаклонное вскрытие $H_{п1}$ изменяется с шагом, равным высоте нерабочего уступа, $h_у$ = 45 м. Как и при определении оптимальной глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами происходит перерасчет объемов вскрыши и экономических показателей. Вскрытие тоннелем рассматривается только в глубинной зоне карьера, где устойчивый угол борта равен 70°–75°. Тоннельное

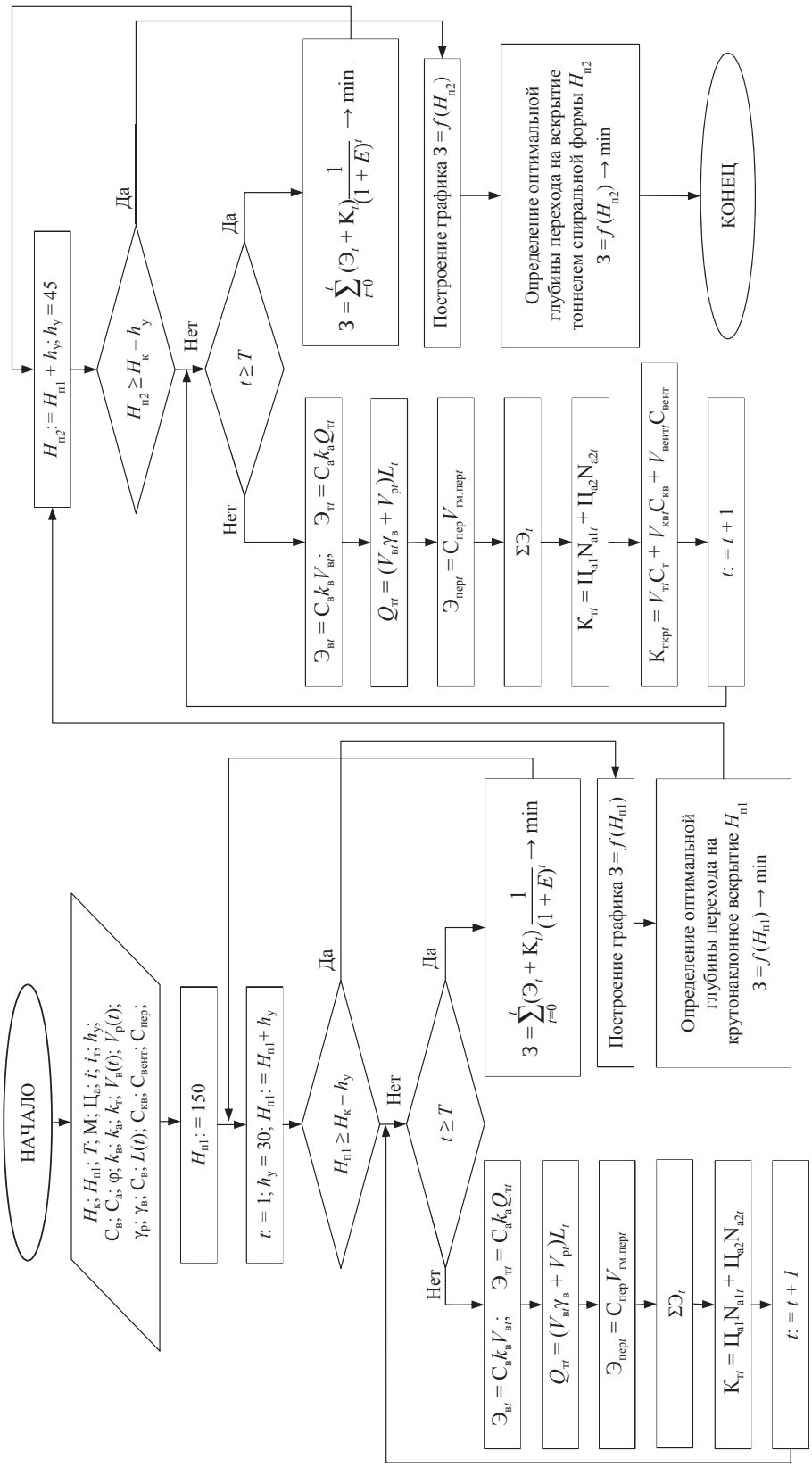

Рисунок 3. Блок-схема методики определения оптимальной глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами и тоннелем спиральной формы
Figure 3. Flowchart of the method for determining the optimal depth of switching to steeply inclined haul ramps and spiral tunnels

вскрытие позволяет максимально приблизить конструктивный угол нерабочих бортов к устойчивому и сократить объемы вскрышных работ. В средней зоне, где устойчивый угол борта составляет 50,0°–51,6°, вскрытие тоннелем будет неконкурентно вскрытию крутонаклонными автосъездами [18].

Затраты на горнокапитальные работы по проходке подземных выработок зависят от их объема и определяются по формуле

$$К_{гкрt} = V_{тt}C_{т} + V_{квt}C_{кв} + V_{вентt}C_{вент},$$

где $V_{тt}$, $V_{квt}$, $V_{вентt}$ – объем проходки в t-ом году тоннеля, квершлагов и вертикальных выработок, соответственно, м^3; $C_{т}$, $C_{кв}$, $C_{вент}$ – стоимость, проходки тоннеля, квершлагов и вентиляционных выработок, соответственно, руб./м^3.

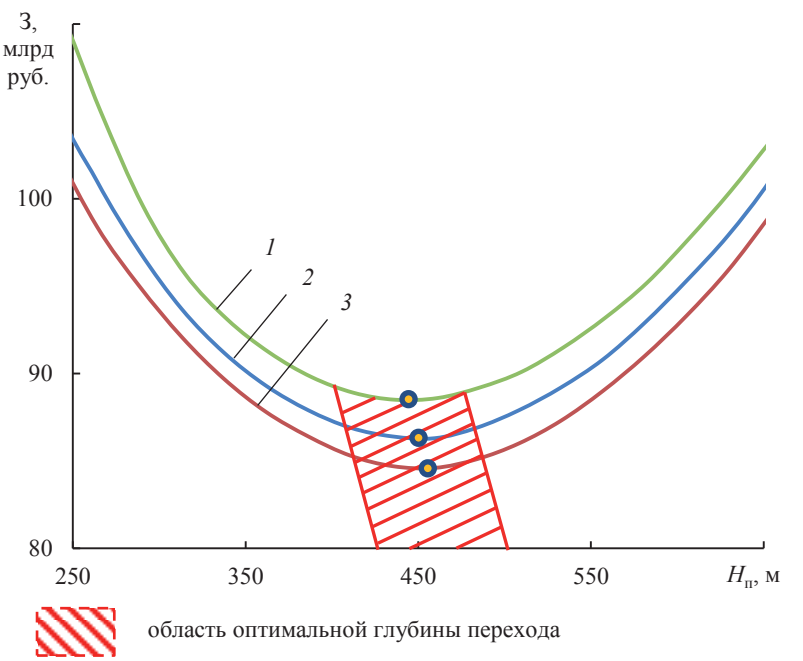

Рисунок 4. Зависимость изменения приведенных затрат на разработку З от глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами $H_п$ и уклона автосъезда i: *1* – 16 %; *2* – 20 %; *3* – 24 % (при $h_у$ = 30 м, М = 100 м)
Figure 4. Dependence of the change in total discounted mining costs З on the depth $H_п$ of switching to steeply inclined haul ramps and the haul ramp slope i: *1* – 16%; *2* – 20%; *3* – 24% (under $h_у$ = 30 m, M = 100 m)

Затраты на горнокапитальные работы снижаются с увеличением глубины перехода, так как сокращается общая протяженность подземных выработок.

Изменение эксплуатационных затрат на выемку вскрыши и транспортирование горной массы автосамосвалами при увеличении глубины перехода на тоннельное вскрытие имеет характер, аналогичный переходу на вскрытие крутонаклонными автосъездами. Отличие заключается в меньших темпах изменения указанных затрат, зависящих от сокращаемых объемов вскрыши. Вследствие этого зависимость приведенных затрат на разработку от глубины перехода на тоннельное вскрытие имеет также экстремальный характер.

На рис. 5 представлены обобщенные зависимости приведенных затрат на разработку от глубины перехода $H_п$ на крутонаклонное вскрытие и вскрытие тоннелем. Установлено, что оптимальная глубина перехода на тоннельное вскрытие

равна 570 м, что составляет 72 % от конечной глубины карьера ($H_к$ = 750 м). При этом затраты на разработку сокращаются в 1,75 раза по сравнению с базовым вариантом и в 1,3 раза по сравнению с вариантом вскрытия крутонаклонными автосъездами.

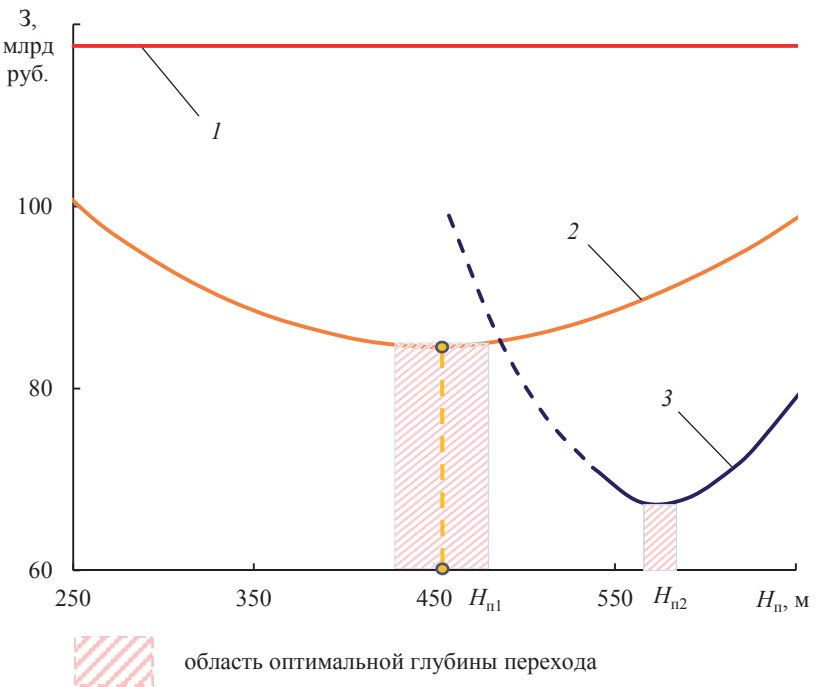

Рисунок 5. Зависимость изменения приведенных затрат на разработку З от глубины перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами (2 – i = 24 %) и законтурным тоннелем спиральной формы 3 (М = 100 м): 1 – i = 8 % (базовый вариант); $H_{п1}$ – оптимальная глубина перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами; $H_{п2}$ – оптимальная глубина перехода на вскрытие тоннелем

Figure 5. Dependence of the change in total discounted mining costs З on the depth of switching to steeply inclined haul ramps (*2* – i = 24 %) and spiral tunnels at the periphery of the open pit *3* (М = 100 m): *1* – i = 8% (base case); $H_{п1}$ – optimal depth for switching to steeply inclined haul ramps; $H_{п2}$ – optimal depth for switching to tunnels

Технико-экономическая оценка и выводы. Установлено, что эффективность и оптимальная глубина перехода на вскрытие крутонаклонными автосъездами определяются снижением приведенных затрат на разработку месторождения, зависят от уклона вскрывающих выработок, сокращения разноса бортов карьера, мощности рудного тела, себестоимости вскрышных работ и соотношения себестоимости транспортирования полноприводных автосамосвалов и автосамосвалов с колесной формулой 4 × 2. Область оптимальных значений глубины перехода имеет устойчивый характер, составляя 57–67 % от проектной глубины карьера. Смещение оптимальной глубины перехода в большую сторону наблюдается при увеличении уклона автосъездов и себестоимости транспортирования горной массы полноприводными автосамосвалами, а в меньшую – при их снижении или увеличении себестоимости вскрышных работ.

Переход на тоннельное вскрытие эффективен на заключительном этапе разработки карьера, когда будут исчерпаны возможности альтернативных и менее затратных способов увеличения углов откоса нерабочих бортов. Предварительными расчетами установлено, что внедрение комбинированной схемы вскрытия с ис-

пользованием крутонаклонных автосъездов и законтурного автомобильного тоннеля спиральной формы на Нюрбинском карьере АК «АЛРОСА» (ПАО) позволит сократить объем вскрыши в 8 раз по сравнению с традиционной схемой вскрытия. Экономический эффект составит 13,7 млрд руб.

Область применения результатов. Разработанная методика оценки эффективности и глубины перехода на инновационные схемы вскрытия может найти применение не только при разработке кимберлитовых карьеров, но также при открытой разработке месторождений руд цветных и благородных металлов, представленных крутопадающими залежами округлой формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантурия В. А., Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р., Чаадаев А. С., Махрачев А. Ф. Комплексные исследования и внедрение инновационных геотехнологий добычи и глубокой переработки кимберлитов // Горный журнал. 2011. № 1. С. 10–13.

2. Еремин Г. М. О концепции разработки рудного тела на всю его мощность сверхглубоким карьером при крутых бортах с применением подземных выработок // ГИАБ. 2016. № 11. С. 192–197.

3. Рыльникова М. В. Условия и принципы устойчивого развития горнодобывающих предприятий в период повышенных рисков и глобальных вызовов // Горная промышленность. 2022. № 3. С. 69–73.

4. Коваленко В. С. О развитии теории систем открытых горных работ // Научные проблемы горного производства: сб. тр. М.: Изд-во МГГУ, 2000. 355 с.

5. Abdollahisharif J., Bakhtavar E., Shahtiar K. Open-pit to underground mining. Where is the optimum transition depth? In book: New challenges and visions for mining. 2025. P. 189–196 DOI: 10.1201/9781003759829-20

6. Teplicka K., Hurna S. Optimizing internal transport in terms of technical parameters in a mining company // Acta Logistica. 2023. Vol. 10. No. 1. P. 95–103. DOI: 10.22306/al.v10i1.360

7. Хохряков В. С. Оценка эффективности инвестиционных проектов открытых горных разработок. Екатеринбург: Изд. УГГГА, 1996. 180 с.

8. Салманов О. Н. Новый метод учета фактора времени при оценке месторождений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 1995. № 1. С. 48–53.

9. Трубецкой К. Н., Пешков А. А., Мацко Н. А. Методы оценки эффективности инвестиций горных предприятий // Горный журнал. 1993. № 2. С. 3–11.

10. Лель Ю. И., Бокий И. Б., Глебов И. А., Исаков С. В., Ганиев Р. С. Технология формирования нерабочих бортов глубоких кимберлитовых карьеров // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 6. С. 39–52. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-6-39-52

11. Вилкул Ю. Г., Слободянюк В. К., Максимов И. И. Теоретические основы определения объемов горнокапитальных работ при вскрытии глубоких карьеров трассами спиральной формы // ГИАБ. 2007. № 7. С.17–23.

12. Akishev A. N., Lel' Iu. I., Bokii I. V., Isakov S. V., Glebov I. A. Kimberlite deposits opencast mining innovative technology with variable geometry of non-mining open pit edges // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2018. No. 8. P. 5–15.

13. Мариев П. Л., Егоров А. Н., Войтов В. Т. Особенности работы карьерных самосвалов в условиях глубоких карьеров и повышенных уклонов // Горный журнал. 2011. № 10. С. 63–66.

14. Hustrulid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining // Mining Engineering. 1987. Vol. 39. No. 2. P. 119–123.

15. Liu B. W., Li S. C., Li W., Zhou J. Influence of underground mining direction under plane condition over slope under open-underground combbined mining // Proceeding of 2015 International symposium – safety and high efficiency mining in coal. 2015. P. 180–187.

16. Akdag S., Basarir H., Karpuz C., Ozyurt V. Stability analysis and optimized slope angle for the iron ore open-pit mine // Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exibition of Turkey. IMCET 2015. P. 606–611.

17. Веретенников В. Г., Синицын В. А. Метод переменного действия. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 272 с.

18. Лель Ю. И., Глебов И. А., Исаков С. В., Мусихина О. В., Ганиев Р. С. Технология перехода на тоннельное вскрытие при доработке глубоких кимберлитовых карьеров // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2023. № 6. С. 38–49. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-38-49

Поступила в редакцию 21 сентября 2026 года

Сведения об авторах:

Коваленко Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН. E-mail: kovalenko_v@ipkonran.ru

Лель Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета; заместитель

главного редактора издания «Известия вузов. Горный журнал». E-mail: lel49@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0590-4482
Глебов Игорь Андреевич – старший преподаватель кафедры разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета. E-mail: i.glebov@igduran.ru
Исаков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений открытым способом Уральского государственного горного университета. E-mail: isakov.npo@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-8-19

Assessing the efficiency and depth of switching to innovative overburden removal schemes when developing kimberlite pipes

Vladimir S. Kovalenko[1], Iurii I. Lel[2], Igor A. Glebov[2], Sergei V. Isakov[2]
[1] N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS (IPKON RAS), Moscow, Russia.
[2] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

The research objective *is to develop a method for assessing the efficiency and depth of switching to innovative overburden removal schemes that reduce overburden works and expand opencast mining at diamond deposits.*

Research relevance. *The increasing complexity and labor intensity of rock haulage while relying on existing truck transportation is typical of kimberlite pipes development, which is also accompanied by increasing extraction costs. Switching to innovative overburden removal schemes at a certain depth and employing steep haul ramps and spiral tunnels at the periphery of the open pit as well as all-wheel-drive haul trucks is a technology solution to improve the efficiency of mining. This approach will make it possible to increase the angles of slope of non-working pit walls, reduce additional overburden removal associated with access excavations, cut overall development costs, and allow for pit development to depths of 700–750 m.*

Methods of research. *A methodology was developed to justify the efficiency and depth of switching to innovative overburden removal schemes at a kimberlite pipe. The methodology is based on economic and mathematical modelling and includes: accounting for changes in haulage costs based on truck models and haul ramp slopes over the open pit's development; accounting for additional pit wall flattening associated with transport infrastructure; differentiated assessment of the effect the mining conditions have on transport performance and overburden removal costs; accounting for the capital and operating costs associated with constructing and maintaining underground workings under tunnel opening.*

Results. *It has been determined that implementing a combined overburden removal scheme employing steep haul ramps and spiral tunnels at the periphery of the open pit at the Nyurbinsky open pit (PJSC ALROSA) will reduce the average operating stripping ratio by a factor of 8 (from 37.7 to 4.7 m³/t) compared to the traditional overburden removal method and mine to a depth of 750 m, which will match the depth of explored reserves, with an expected economic benefit being 13.7 billion rubles.*

Application of research results. *The proposed innovative overburden removal schemes can be applied not only to kimberlite pipes but also to opencast mining of non-ferrous and precious metal ores occurring in steeply pitching circular deposits.*

Keywords: *open pit; haul ramp slope; angle of slope of the pit wall; all-wheel-drive haul truck; ore body thickness; capital investment; operating costs; total discounted mining costs; depth of switching; innovative overburden removal scheme.*

REFERENCES

1. Chanturia V. A., Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R., Chaadaev A. S., Makhrachev A. F. Complex researches and implementation of innovation geotechnologies of extraction and deep processing of kimberlite. *Gornyi Zhurnal = Mining Journal.* 2011; 1: 10–13. (In Russ.)

2. Eremin G. M. On a concept of full-thickness development of thick ore body by super-deep steep wall open-pit with using underground excavations. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2016; 11: 192–197. (In Russ.)

3. Rylnikova M. V. Conditions and principles for sustainable development of mining companies during a period of higher risks and global challenges. *Gornaia promyshlennost = Russian Mining Industry.* 2022; 3: 69–73. (In Russ.)

4. Kovalenko V. S. The development of the opencast mining theory. In: *Scientific Problems of Mining: Proceedings*. Moscow: MSMU Publishing; 2000. (In Russ.)

5. Abdollahisharif J., Bakhtavar E., Shahtiar K. Open-pit to underground mining. Where is the optimum transition depth? In: *New Challenges and Visions for Mining.* 2025. P. 189–196. DOI: 10.1201/9781003759829-20

6. Teplicka K., Hurna S. Optimizing internal transport in terms of technical parameters in a mining company. *Acta Logistica.* 2023; 10(1): 95–103. DOI: 10.22306/al.v10i1.360

7. Khokhriakov V. S. *Assessing the efficiency of opencast mining investment projects.* Ekaterinburg: USMGA Publishing; 1996. (In Russ.)

8. Salmanov O. N. A new method for accounting for the time factor when assessing mineral deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 1995; 1: 48–53. (In Russ.)

9. Trubetskoi K. N., Peshkov A. A., Matsko N. A. Methods for evaluating the investment efficiency of mining enterprises. *Gornyi Zhurnal = Mining Journal.* 1993; 2: 3–11. (In Russ.)

10. Lel Iu. I., Bokii I. B., Glebov I. A., Isakov S. V., Ganiev R. S. A technology for nonmining flanks formation at deep kimberlite open pits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2022; 6: 39–52. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2022-6-39-52

11. Vilkul Iu. G., Slobodianiuk V. K., Maksimov I. I. Theoretical foundations for determining the amount of capital mining operations when opening deep open-pit mines with spiral haul roads. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2007; 7: 17–23. (In Russ.)

12. Akishev A. N., Lel' Iu. I., Bokii I. V., Isakov S. V., Glebov I. A. Kimberlite deposits opencast mining innovative technology with variable geometry of non-mining open pit edges. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2018; 8: 5–15. (In Russ.)

13. Mariev P. L., Egorov A. N., Voitov V. T. Features of mine dump truck working in the conditions of deep quarry and higher slopes of pit roads. *Gornyi Zhurnal = Mining Journal.* 2011; 10: 63–66. (In Russ.)

14. Hustrulid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining. *Mining Engineering.* 1987; 39(2): 119–123.

15. Liu B. W., Li S. C., Li W., Zhou J. Influence of underground mining direction under plane condition over slope under open-underground combbined mining. In: *Proceeding of 2015 International symposium – safety and high efficiency mining in coal.* 2015. P. 180–187.

16. Akdag S., Basarir H., Karpuz C., Ozyurt V. Stability analysis and optimized slope angle for the iron ore open-pit mine. In: *Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exibition of Turkey. IMCET* 2015. P. 606–611.

17. Veretennikov V. G., Sinitsyn V. A. *Alternating method.* Moscow: FIZMATLIT Publishing; 2005. (In Russ.)

18. Lel Iu. I., Glebov I. A., Isakov S. V., Musikhina O. V., Ganiev R. S. The technology of transition to tunnel opening when cleaning up deep kimberlite pipes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2023; 6: 38–49. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-38-49

Received 21 September 2026

Information about the authors:

Vladimir S. Kovalenko – DSc (Engineering), Professor, leading researcher, N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS (IPKON RAS). E-mail: kovalenko_v@ipkonran.ru

Iurii I. Lel – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Opencast Mining, Deputy editor-in-chief of Minerals and Mining Engineering. E-mail: lel49@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0590-4482

Igor A. Glebov – senior lecturer, Department of Opencast Mining, Ural State Mining University. E-mail: i.glebov@igduran.ru; https://orcid.org/0000-0003-4436-3594

Sergei V. Isakov – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Opencast Mining, Ural State Mining University. E-mail: isakov.npo@mail.ru

Для цитирования: Коваленко В. С., Лель Ю. И., Глебов И. А., Исаков С. В. Оценка эффективности и глубины перехода на инновационные схемы вскрытия при разработке кимберлитовых карьеров // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2026. № 5. С. 8–19. DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-8-19

For citation: Kovalenko V. S., Lel Iu. I., Glebov I. A., Isakov S. V. Assessing the efficiency and depth of switching to innovative overburden removal schemes when developing kimberlite pipes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2026; 5: 8–19 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-8-19