

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271.06:001895

### ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УКЛОНОВ ВСКРЫВАЮЩИХ ВЫРАБОТОК ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Г. Г. Саканцев<sup>1</sup>, В. И. Ческидов<sup>2</sup>, И. В. Зырянов<sup>3</sup>, А. Н. Акишев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела УрО РАН, E-mail: yakovlev@igduran.ru,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620075, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: cheskid@misd.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт "Якутнипроалмаз" АК "АЛРОСА", E-mail: AkishevAN@alrosa.ru,  
ул. Ленина, 39, 678174, г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

Установлено влияние уклона вскрывающих выработок на дополнительный разнос нерабочих бортов, необходимый для размещения этих выработок. Для определения дополнительного разноса бортов разработан аналитический метод, позволяющий оперативно и с необходимой точностью решать эту задачу. Доказано, что увеличение уклона вскрывающих выработок до максимально возможных значений (20–24 %) обеспечивает сокращение объемов вскрышных работ глубоких карьеров на 20–40 %. На эффективность горных работ, связанную с применением крутых уклонов, помимо дополнительного разноса бортов влияет глубина перехода на эти уклоны, а также провозная способность вскрывающих выработок, обусловленная распределением объемов горных работ по глубине отработки месторождения. Показано, что наиболее целесообразной является схема вскрытия месторождений с постепенным увеличением уклонов по мере понижения горных работ от базового значения (8 %) к максимально возможным по техническим и технологическим условиям.

*Глубокие карьеры, уклон вскрывающих выработок, дополнительный разнос бортов, переходные процессы, дисконтированные затраты*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180111

Горнодобывающая промышленность России последних десятилетий характеризуется непрерывным повышением трудоемкости и себестоимости добычи большинства видов минерального сырья вследствие истощения запасов большинства разведанных месторождений с благоприятными горно-геологическими и горнотехническими условиями [1, 2]. В этой связи одним из наиболее реальных способов повышения эффективности освоения месторождений является снижение объемов дополнительного разноса нерабочих бортов глубоких карьеров за счет перевода вскрывающих выработок на более крутые уклоны [3]. Особенно это касается карьеров округлой формы, которые характеризуются повышенными текущими объемами вскрышных работ [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных научных исследований УрО РАН на 2016–2018 гг. (№ 0405-2015-0010).

Для применения крутых уклонов на глубоких карьерах в настоящее время есть все технические и технологические возможности. Это подтверждается расчетами и уже имеющимся практическим опытом. В частности, уклоны от 10 до 18 % на Сибайском карьере (Республика Башкортостан) имеют 8 % дорог, на Михайловском ГОКе (Курская область) — 12 %, на Северо-Западном карьере Азербайджанского ГОКа — 30 % [5]. На сборочном автомобильном транспорте максимальный уклон отдельных участков трассы достигает 12–16 %. При этом существует общая закономерность увеличения уклонов с ростом глубины карьеров.

Крутые уклоны регламентируются нормативными документами. Так, Нормами технологического проектирования карьеров черной металлургии для автосамосвалов с колесными формулами 4×4 и 6×6 для карьерных автодорог со щебеночным покрытием допускаются уклоны 17 %, с грунтовым покрытием — 14–15 %. В свою очередь, СНиП 2.05.07–85 для аналогичных условий устанавливает уклоны 18 и 13–14 % соответственно.

Значительные возможности при работе на крутых уклонах имеют автосамосвалы с сочлененной рамой, в частности автосамосвалы Volvo грузоподъемностью 30 и 40 т. Их использование обеспечивает возможность преодоления уклонов 16 % при длине транспортирования до 1500 м. Теоретические и экспериментальные исследования технических возможностей позволили рекомендовать для специализированных и полноприводных автосамосвалов с колесной формулой 4×4 для постоянных дорог уклон 12–15 % и для переменных 10–12 % [6]. Удельная мощность таких автосамосвалов должна быть не ниже 7–8 кВт/т. В последнее время ведутся работы по созданию надежных транспортных средств, способных преодолевать более крутые уклоны до 20–25 %, например карьерные гусеничные самосвалы [6].

Снижение объемов дополнительного разноса бортов карьеров на основе увеличения уклонов вскрывающих выработок, с одной стороны, обеспечивает снижение затрат на вскрышные работы, с другой — ведет к увеличению транспортных расходов, связанных с применением крутых уклонов [3]. Из-за отсутствия четкой зависимости между этими параметрами представляется необходимым определить взаимосвязь всех факторов, влияющих на выбор границ карьеров.

Цель настоящего исследования — установление взаимосвязи основных параметров технологических процессов в динамике открытых горных работ по двум направлениям: изыскание эффективных схем вскрытия месторождений полезных ископаемых и инновационных методов определения границ карьеров, направленных на эффективное использование запасов недр. Решение задачи предусматривается на основе анализа и оценки наиболее вероятных вариантов технологических схем горных работ с изменяющимися параметрами, в первую очередь глубины карьеров, уклона вскрывающих выработок и глубины перехода с одного уклона на другой. Целесообразность применения метода вариантов обусловлена его относительной простотой и достаточной надежностью.

В качестве объектов для исследования приняты крутопадающие месторождения округлой формы с углом падения залежей 90°. Рассмотрено три варианта карьера с изменяющимися параметрами: глубина (240, 400 и 500 м), угол наклона рабочего борта  $\varphi$  (9, 18 и 27°) и уклон вскрывающих выработок (8, 16 и 24 %). Устойчивый угол нерабочих бортов карьеров принят 45° (без учета дополнительного разноса бортов для размещения вскрывающих выработок). Для каждого варианта горных работ предусмотрен определенный порядок формирования карьерного пространства, предполагающий, в частности, переход с уклона вскрывающих выработок 8 % на 16 % (схема вскрытия I), с уклона 8 % на 24 % (схема вскрытия II) и с уклона 8 % на 16 %, затем на уклон 24 % (схема вскрытия III). В каждой схеме вскрытия имеется по пять вариантов распределения значений уклонов по глубине карьера. С этой целью карьер разбит на пять эта-

пов его разработки (рис. 1). Первый этап включает выемку объемов горных пород от начала разработки месторождения до подхода рабочего борта к его предельному контуру по поверхности. Остальная часть карьерного пространства разделена по глубине на четыре равных этапа (2–5), которым соответствует тот или иной уклон, предусмотренный в схеме. На первом этапе во всех вариантах границ карьера величина уклона не влияет на дополнительный разнос его нерабочих бортов (в исследованиях принят уклон 8 %).

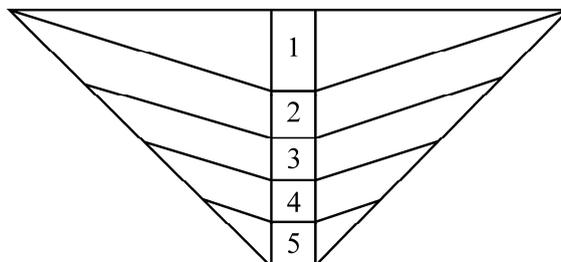


Рис. 1. Этапы формирования карьерного пространства

Дополнительный разнос бортов по поверхности  $\Delta R$ , необходимый для размещения вскрывающих выработок, при разных схемах вскрытия и вариантах распределения уклонов по этапам формирования карьерного пространства приведен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Значения дополнительного разноса бортов по поверхности карьера по вариантам его вскрытия при угле наклона рабочего борта  $18^\circ$

Схема вскрытия	Вариант распределения уклонов по этапам	Распределение уклонов по этапам формирования карьерного пространства, %					Дополнительный разнос бортов по поверхности $\Delta R$ , м		
		Этап					Глубина карьеров, м		
		1	2	3	4	5	240	400	560
I	1	8	8	8	8	8	130	158	177
	2	8	8	8	8	16	100	109	119
	3	8	8	8	16	16	76	90	98
	4	8	8	16	16	16	65	77	86
	5	8	16	16	16	16	56	69	77
II	1	8	8	8	8	8	130	158	177
	2	8	8	8	8	24	82	94	100
	3	8	8	8	24	24	57	68	74
	4	8	8	24	24	24	44	52	57
	5	8	24	24	24	24	33	40	45
III	1	8	16	16	16	16	56	69	77
	2	8	16	16	16	24	45	53	58
	3	8	16	16	24	24	37	47	52
	4	8	16	24	24	24	36	43	48
	5	8	24	24	24	24	33	40	45

Порядок распределения уклонов в принятых для сравнения схемах вскрытия предполагает варьирование значений уклонов по этапам. Так, в схеме вскрытия I возможен вариант с распределением уклонов 8–8–8–8–8–8 (вариант 1), 8–8–8–8–16 (вариант 2), 8–8–8–16–16 (вариант 3), 8–8–16–16–16 (вариант 4), 8–16–16–16–16 (вариант 5).

Для этапов с уклоном 8 % предусмотрено применение автосамосвалов грузоподъемностью 120 т, для этапов с уклоном 16 % — автосамосвалов 75 т, для этапов с уклоном 24 % — автосамосвалов с шарнирно-сочлененными рамами грузоподъемностью 30–40 т. Ширина съездов, соответственно, принята равной 30, 26 и 23 м. В процессе исследований рассмотрено 135 вариантов схем вскрытия карьеров. Для каждого варианта установлены объемы вскрышных работ с учетом дополнительного разноса бортов для размещения вскрывающих выработок и расстояния перевозки горной массы в рабочей зоне карьера и по его борту до выхода на поверхность, проведена экономическая оценка вариантов.

В основу расчета объемов дополнительного разноса бортов для размещения вскрывающих выработок заложен аналитический метод, позволяющий с высокой точностью решать поставленную задачу [7]. С этой целью для каждого горизонта карьера, начиная со дна, определяется относительная длина части его периметра  $d_m$ , занимаемая вскрывающей выработкой длиной  $L_b$ , или относительная длина вскрывающей выработки, по условию

$$d_m = \frac{L_b}{L_n}, \quad (1)$$

где  $L_n$  — периметр  $m$ -го горизонта, установленный по условиям устойчивости борта, м.

Величина разноса каждого горизонта  $\Delta R_m$ , необходимая для размещения всех вскрывающих выработок, расположенных на рабочем борту, находится последовательным суммированием (нарастающим итогом) удельной длины вскрывающих выработок  $d_m$  всех вышележащих уступов, умноженных на ширину этих выработок  $B_b$ :

$$\Delta R_m = \sum_{i=1}^m d_i B_{bi}, \quad (2)$$

Результирующий радиус горизонта, установленный по условиям устойчивости борта и размещения на нем вскрывающих выработок, рассчитывается в виде суммы радиусов горизонтов по условиям устойчивости  $R_y$  и величины дополнительного разноса борта, необходимого для размещения вскрывающих выработок  $\Delta R$ .

В табл. 2, на примере схемы I, приведены результаты расчета дополнительного разноса борта для карьера глубиной 240 м с радиусом дна карьера 40 м, шириной вскрывающих выработок 26 м в нижней (гор. 0, +20, +40 м) и 30 м в верхней части карьера при устойчивом угле откоса бортов карьера  $45^\circ$ . Удельная длина вскрывающих выработок на горизонтах определена выражением (1), а удельный разнос горизонта — выражением (2).

Следует учитывать, что для обеспечения необходимой провозной способности транспортной сети карьера число вскрывающих выработок на его предельном борту, особенно на верхних горизонтах, может увеличиваться до 2 раз и более. В этих случаях удельная длина вскрывающих выработок и удельный разнос борта на горизонте соответственно увеличивается в число раз, равное количеству вскрывающих выработок. Например, в табл. 2 горизонты 180, 200 и 220 м вскрыты двумя вскрывающими выработками. Соответственно удельный разнос борта на этих горизонтах составит 10.86, 9.96 и 9.18 м.

Нарастающая величина разноса борта по горизонтам отражает дополнительный разнос борта, необходимый для размещения вскрывающих выработок на данном борту в зависимости от его высоты.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета дополнительного разноса бортов карьера по горизонтам для размещения вскрывающих выработок

Отметка горизонта, м	Средний радиус горизонта $R_m$ , м	Периметр горизонта $L_m$ , м	Удельная длина вскрывающей выработки на горизонте $d_m$	Удельный разнос борта $d_m B_m$ , м	Суммарный разнос борта $\Delta R_m$ , м
220	260	1633	0.306***	9.18***	109.76
200	240	1507	0.332***	9.96***	100.58
180	220	1382	0.368***	10.86***	90.62
160	200	1256	0.199**	5.97	79.76
140	180	1130	0.222**	6.66	73.79
120	160	1005	0.249**	7.47	67.13
100	140	879	0.285**	8.55	59.66
80	120	754	0.332**	9.66	51.11
60	100	628	0.399**	11.97	41.45
40	80	502	0.249*	6.47	29.48
20	60	377	0.387*	10.06	23.01
0	40	251	0.498*	12.95	12.95

\* — уклон 16%; \*\* — уклон 8%; \*\*\* — по два съезда на горизонтах с уклоном 8%

Исследования, проведенные на основе аналитического метода определения разноса бортов для размещения вскрывающих выработок, показали, что дополнительный разнос бортов в значительной степени зависит от глубины карьера, величины уклонов вскрывающих выработок и расположения их по глубине карьера. В целом объем дополнительного разноса бортов растет с увеличением глубины карьеров и снижением уклона вскрывающих выработок (табл. 1).

Объем первого этапа карьера с учетом дополнительного разноса его бортов рассчитывается по формуле

$$V = \frac{\pi}{3} (R_y + \Delta R)^3 \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

где  $R_y + \Delta R$  — радиус борта карьера по поверхности по условиям устойчивости и соответствующая величина его дополнительного разноса, необходимая для размещения вскрывающих выработок, м;  $\varphi$  — угол откоса рабочего борта карьера, град.

Объемы остальных этапов могут быть вычислены (считая снизу) по выражению

$$V_n = \frac{\pi}{3} (R_{y_n} + \Delta R_n)^2 (\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \varphi) R_n - \sum_{i=1}^{n-1} V_i, \quad (4)$$

здесь  $R_{y_n} + \Delta R_n$  — радиус  $n$ -го этапа по верху и величина его дополнительного разноса, м;  $\gamma$  — угол откоса нерабочего борта карьера, град.

Результаты определения объема карьеров, приведенные в табл. 3, показывают, что увеличение уклона вскрывающих выработок до 20–24% (при  $\varphi = 18^\circ$ ) обеспечивает сокращение объемов на 20–40%.

Зависимости объемов карьеров от удельного веса крутых уклонов по глубине карьера приведены на рис. 2. Видно, что при глубине карьера 560 м его объем при переходе с уклона 8% на 24% (схема II) на глубине 280 м соответствует объему при переходе с уклона 8% на 16% (схема I) на глубине 184 м, что свидетельствует о возможности изменения параметров горных работ в процессе эксплуатации карьера путем варьирования схемами вскрытия.

ТАБЛИЦА 3. Объем карьера по вариантам вскрытия месторождения при угле наклона борта карьера 18°, млн м<sup>3</sup>

Схема вскрытия	Вариант вскрытия	Объем карьера при его глубине, м		
		240	400	560
I	1	49.4	165.2	380.3
	2	42.5	139.2	325.7
	3	37.3	129.8	306.4
	4	35.0	123.5	296.5
	5	33.2	120.0	288.7
II	1	45.4	157.7	363.3
	2	38.5	131.7	308.7
	3	33.4	119.2	282.8
	4	30.9	111.8	271.9
	5	28.8	106.4	262.1
III	1	33.2	119.7	288.7
	2	31.1	112.3	272.8
	3	29.5	109.6	267.8
	4	29.1	107.8	264.5
	5	28.8	106.4	262.1

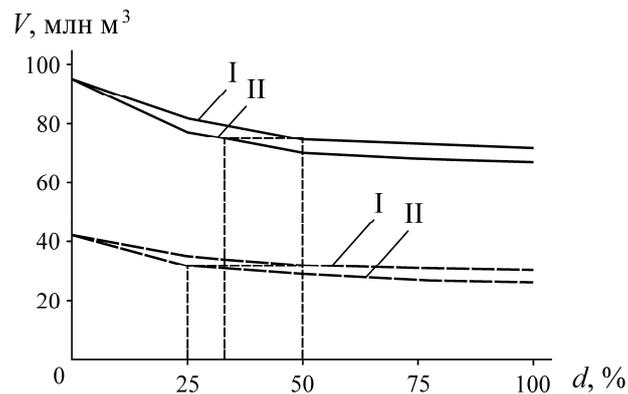


Рис. 2. Зависимость объемов горной массы  $V$  в границах карьеров от удельного веса крутых уклонов  $d$ : сплошная линия — глубина карьера 560 м, штриховая — 400 м; I, II — схемы вскрытия

Полученные данные свидетельствуют о необходимости детального исследования трудозатрат по транспортированию горной массы в изменяющихся условиях эксплуатации карьера, учета всего объема горных работ и распределения их по времени отработки месторождений. С этой целью проведена экономическая оценка всех рассмотренных вариантов вскрытия месторождений на основе расчета прямых и дисконтированных затрат [8–10]. В качестве критерия для оценки принят минимум дисконтированных затрат (руб.) на разработку месторождений:

$$Z = \sum_{i=1}^N C_v (V + Q)_i + \sum_{i=1}^q \frac{C_i B_i}{y_i K_{pt_i}} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $V, Q$  — годовые объемы вскрышных и добычных работ, м<sup>3</sup>;  $N$  — срок отработки месторождения;  $C_v$  — себестоимость выемки горной массы (без учета транспортной составляющей);  $C_i$  — себестоимость перевозки горной массы при  $i$ -м уклоне, руб./м<sup>3</sup>·м;  $B_i$  — высота подъема горной массы в зоне  $i$ -го уклона, м;  $q$  — число зон с разными уклонами;  $y_i$  —  $i$ -й уклон транспортных коммуникаций, %;  $K_{pt_i}$  — коэффициент развития трассы при  $i$ -м уклоне.

В качестве исходных стоимостных показателей для экономической оценки вариантов приняты данные по результатам проектных работ и научных исследований последних лет с учетом фактических показателей действующих предприятий-аналогов [5, 11, 12]. Себестоимость транспортирования горной массы для уклона 8 % установлена 14 руб./( $\text{м}^3 \cdot \text{км}$ ), для уклона 16 % — 34 руб./( $\text{м}^3 \cdot \text{км}$ ), для уклона 24 % — 63 руб./( $\text{м}^3 \cdot \text{км}$ ). Бестранспортная составляющая себестоимости перемещения горной массы принята 68 руб./ $\text{м}^3$ .

Все расчеты по экономической оценке вариантов выполнены исходя из условия, что специализированные транспортные средства, способные работать на крутых уклонах, должны применяться и в частях рабочей зоны, примыкающих к крутым уклонам нерабочих бортов. Это обусловлено тем, что большегрузные транспортные средства, традиционно применяемые для перемещения основного объема горной массы при уклонах до 8 %, невозможно использовать на крутых вскрывающих выработках, что является существенным недостатком технологических схем.

В результате статистической обработки полученных расчетов определены значения дисконтированных затрат по этапам разработки для каждого принятого к оценке варианта горных работ с изменяющимися параметрами: конечной глубины карьера, наклона рабочего борта и схемы вскрытия (табл. 4). Из таблицы видно, что величина дисконтированных затрат зависит от номера этапа разработки  $n$ , характеризующей глубину перехода на крутой уклон (16 и 24 %). Однако определение дисконтированных затрат по порядковому номеру этапа даст только приближенное значение искомых величин, особенно при большой глубине карьера, и соответственно его отдельных этапов. Чтобы определить реальное значение, необходимо перейти к конкретной глубине. Для этого достаточно взять первые производные от установленных зависимостей  $Z = f(n)$  и использовать их для выявления целесообразной глубины перехода на крутые уклоны. Уточненная глубина перехода на крутой уклон по предельному борту карьера может быть получена из выражения

$$H_n = 25(5 - x'), \quad (6)$$

где  $x'$  — первая производная функциональной зависимости.

Аналитические выражения для оценки дисконтированных затрат по этапам разработки месторождения в сводном виде приведены в табл. 4.

Минимальные дисконтированные затраты, соответствующие уточненным глубинам перехода на крутые уклоны, должны определяться по зависимостям (7)–(33) табл. 4 исходя из значения первой производной  $x'$ . При этом должна учитываться провозная способность вскрывающих выработок [13], с учетом которой в схемах вскрытия II (8–24) и III (8–16–24) и глубине карьеров 560 м значение глубины перехода на крутые уклоны составит 280 м. Откорректированные значения минимальных дисконтированных затрат по исследуемым вариантам, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что при глубине карьеров 240 и 400 м глубина перехода на крутые уклоны в значительной степени зависит от величины уклона. Так, в схеме I уклон 16 % целесообразно формировать непосредственно с поверхности. Переход на уклон 24 % в схемах II и III, как более эффективный для сокращения дополнительного разноса бортов, рационально осуществлять на пониженных отметках. Для глубины карьера 560 м увеличение глубины ввода уклона 24 % определяется провозной способностью вскрывающих выработок.

ТАБЛИЦА 4. Дисконтированные затраты на отработку месторождения по глубине перехода на вскрывающие выработки с крутыми уклонами

Глубина карьера, м	Угол наклона рабочего борта, град	Схема вскрытия	Зависимость дисконтированных затрат от порядкового номера этапа $З = f(n)$	Первая проводная $x'$ зависимости $З = f(n)$	Глубина перехода на крутой уклон		Дисконтированные затраты, млн руб.
					м	%	
240	9	I	$З = 2.8 - 0.114n - 0.25n^2$ (7)*	5.70	0	0	1.980
		II	$З = 2.69 - 0.342n + 0.031n^2$ (8)	5.52	0	0	1.757
		III	$З = 3.32 - 0.904n + 0.119n^2$ (9)	3.80	72	30	1.604
	18	I	$З = 2.8 - 0.307n + 0.021n^2$ (10)	7.30	0	0	1.790
		II	$З = 2.8 - 0.5n + 0.0514n^2$ (11)	4.79	12	5	1.680
		III	$З = 3.49 - 1.0n + 0.131n^2$ (12)	3.81	72	30	1.590
	27	I	$З = 2.96 - 0.477n + 0.0429n^2$ (13)	5.56	0	0	1.650
		II	$З = 2.052 - 0.295n + 0.034n^2$ (14)	4.30	41	17	1.461
		III	$З = 3.434 - 1.152n + 0.156n^2$ (15)	3.69	79	33	1.307
400	9	I	$З = 8.566 - 1.116n + 0.12n^2$ (16)	4.65	36	9	5.972
		II	$З = 9.024 - 1.569n + 0.182n^2$ (17)	4.37	68	17	5.643
		III	$З = 10.076 - 2.555n + 0.344n^2$ (18)	3.71	128	32	5.332
	18	I	$З = 9.49 - 2.123n + 0.204n^2$ (19)	4.00	100	25	5.218
		II	$З = 9.82 - 2.54n + 0.82n^2$ (20)	3.97	100	25	4.780
		III	$З = 10.54 - 3.22n + 0.433n^2$ (21)	3.72	128	32	4.550
	27	I	$З = 8.868 - 1.727n + 0.2n^2$ (22)	4.31	68	17	5.143
		II	$З = 9.212 - 2.614n + 0.327n^2$ (23)	4.00	100	25	4.688
		III	$З = 10.644 - 3.418n + 0.467n^2$ (24)	3.67	132	33	4.390
560	9	I	$З = 18.188 - 2.907n + 0.375n^2$ (25)	4.62	56	10	12.247
		II	$З = 16.078 - 1.785n + 0.199n^2$ (26)	4.48	72 (280)**	13 (50)	12.514
		III	$З = 15.91 - 2.791n + 0.352n^2$ (27)	3.96	146 (280)	26 (50)	10.705
	18	I	$З = 18.834 - 3.668n + 0.426n^2$ (28)	4.30	101	18	10.990
		II	$З = 17.762 - 3.6n + 0.447n^2$ (29)	4.03	134 (280)	24 (50)	10.985
		III	$З = 16.226 - 3.39n + 0.454n^2$ (30)	3.73	179 (280)	32 (50)	10.142
	27	I	$З = 18.43 - 3.747n + 0.435n^2$ (31)	4.30	101	18	10.351
		II	$З = 17.41 - 3.769n + 0.489n^2$ (32)	3.85	162 (280)	29 (50)	10.424
		III	$З = 15.526 - 3.212n + 0.436n^2$ (33)	3.68	185 (280)	33 (50)	10.108

Примечание. (7)\* — порядковый номер зависимости; (280)\*\* — по провозной способности вскрывающих выработок

Все это отражается на дисконтированных затратах на ведение горных работ. Так, при глубине карьера 240 м наименьшие дисконтированные затраты имеют практически равноценные схемы вскрытия II и III, которые по сравнению со схемой I обеспечивают экономический эффект более чем на 10%. Но картина значительно меняется с увеличением глубины карьеров.

При глубине 400 и 560 м наиболее эффективной становится схема III. При глубине карьера 400 м она, по сравнению с карьером глубиной 240 м, обеспечивает снижение дисконтированных затрат более чем на 8 %, при глубине карьера 560 м — порядка 5 %. Во всех случаях схема с неоднократно меняющимся уклоном, обеспечивая снижение объемов дополнительного развоза борта, приводит к увеличению экономического эффекта, что может оказать решающее влияние на конечный результат.

Таким образом, наиболее целесообразной схемой вскрытия для всех рассмотренных глубин карьеров является схема III с последовательным увеличением уклона вскрываемых выработок, предполагающая отработку месторождения по следующему сценарию: с уклоном 8 % в первоначальный период работы карьера до момента достижения горными работами его предельного контура на поверхности, далее переход на более крутые уклоны (16 и 24 %) с доработкой месторождения на предельном уклоне.

Приведенные в табл. 4 зависимости дисконтированных затрат от глубины перехода на крутые уклоны (7)–(33), обусловленные определяющими параметрами горных работ (глубиной карьеров, углами наклона рабочих бортов и схемами вскрытия), могут быть использованы для обоснования последних и экономической оценки вариантов работ в различных горнотехнических условиях. В результате статистической обработки зависимость дисконтированных затрат (млн руб.) на разработку месторождения запишется в виде

$$Z = (1.254 - 0.01H_k + 0.000049H_k^2)(1.278 - 0.026\varphi + 0.000504\varphi^2) \times \\ \times (1.021 + 0.0493C - 0.257C^2), \quad (7)$$

где  $C$  — номер схемы вскрытия.

Зависимость глубины перехода на крутые уклоны (%) от определяющих факторов имеет вид

$$H_n = (-13.5 + 0.09375H_k)(0.06 + 0.0924\varphi - 0.00194\varphi^2)(-0.503 + 1.104C - 0.151C^2). \quad (8)$$

Средняя погрешность зависимости (7) равна 7.06 %, а зависимости (8) — 7.56 %, что находится в пределах достоверности фактических показателей открытых горных работ [14].

Полученные результаты исследований при соответствующей достоверности исходных стоимостных показателей могут стать надежной основой для разработки высокоэффективных методов поэтапного определения границ карьеров.

## ВЫВОДЫ

Глубина перехода на крутые уклоны возрастает с понижением горных работ, а также с увеличением углов наклона рабочих бортов и уклона вскрываемых выработок, уменьшения их провозной способности. Наиболее целесообразной схемой вскрытия крутопадающих месторождений является схема с последовательным увеличением уклона вскрываемых выработок по мере понижения горных работ, при которой верхняя часть карьера отрабатывается с уклоном 8 %, средняя — с повышенным уклоном, позволяющим вести работы автосамосвалами средней грузоподъемности, нижняя — с максимальным по техническим и технологическим условиям уклоном с использованием специальных транспортных средств.

Применение результатов исследований позволит повысить достоверность методов определения границ карьеров и способствовать увеличению глубины экономически обоснованной разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом при рациональном использовании запасов недр.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Яковлев В. Л.** О развитии методологических подходов к исследованию проблем освоения недр // Проблемы недропользования. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2015. — Вып. 2. Электронный ресурс: Rh:<http://trud.igduran.ru/edition/3>.
2. **Колганов В. Ф., Акишев А. Н.** Коренные месторождения алмазов Западной Якутии: справочное пособие АК “АЛРОСА”, Институт “Якутнипроалмаз”. — Новосибирск: Гео, 2011. — 215 с.
3. **Саканцев М. Г.** О влиянии уклонов капитальных съездов на средний коэффициент вскрыши // Энергосбережение на карьерном автомобильном транспорте: материалы междунар. науч.-техн. семинара, 24–26 июля 2003 г. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2003. — 270 с.
4. **Чаадаев А. С., Акишев А. Н., Бахтин В. Л., Бабаскин С. Л.** Схемы вскрытия и отработки глубоких горизонтов карьеров крутонаклонными выработками // Горн. пром-сть. — 2008. — № 2. — С. 75–80.
5. **Смирнов В. П., Лель Ю. И.** Теория карьерного большегрузного автомобильного транспорта. — Екатеринбург: УрО РАН, 2002. — 355 с.
6. **Домнин В. Б., Невалин В. М., Бесчастный А. В.** Конструктивные схемы карьерных гусеничных самосвалов // Горн. пром-сть. — 2008. — № 2. — С. 69–71.
7. **Саканцев Г. Г.** Экспресс-метод определения границ карьеров с учетом фактора времени // Проблемы недропользования. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2015. — Вып. 3. — С. 27–34. Электронный ресурс, режим доступа: [trud.igduran.ru](http://trud.igduran.ru).
8. **Хохряков В. С.** Критерии технико-экономической оценки вариантов открытой разработки // Горн. журн. — 1970. — № 9. — С. 16–19.
9. **Методические рекомендации** по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция): утв. Минэкономки, Минфином и Госстроем РФ № ВК 477 от 21.06.99. — М.: Экономика, 2000. — 421 с.
10. **Кортелев О. Б., Ческидов В. И., Норри В. К.** Влияние параметров рабочей зоны на режим горных работ и границы карьеров // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 53–59.
11. **Технико-экономические показатели** горных предприятий за 1990–2009 гг. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2010. — 374 с.
12. **Экономико-математическое моделирование** и проектирование карьеров / В. С. Хохряков, Г. Г. Саканцев и др. — М.: Недра, 1977. — 200 с.
13. **Хохряков В. С.** Проектирование карьеров: учебник для вузов. — М.: Недра, 1992. — 383 с.
14. **Хохряков В. С., Саканцев Г. Г.** Исследование точности технико-экономических показателей при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом // Горн. журн. — 1968. — № 5. — С. 5–21.

*Поступила в редакцию 16/XI 2017*