

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ ГЛУБОКИХ КИМБЕРЛИТОВЫХ КАРЬЕРОВ

КАНТЕМИРОВ В. Д., ТИТОВ Р. С., ЯКОВЛЕВ А. М.

Изложены основные подходы к обоснованию производственной мощности глубоких карьеров. На примере карьеров АК «АЛРОСА» приведены основные проектные параметры, критерии и факторы, определяющие выбор производственной мощности алмазородного карьера в условиях криолитозоны. Для горнотехнических условий открытой разработки кимберлитовых месторождений алмазов исследованы и представлены аналитические зависимости для расчета производительности и срока существования карьеров, отражено влияние скорости понижения горных работ на производительность карьеров. Приведены результаты расчетов по предварительному обоснованию производственной мощности глубоких карьеров АК «АЛРОСА» в зависимости от интенсивности понижения горных работ и экономических факторов. Для карьеров «Юбилейный» и «Удачный» выполнены расчеты по обоснованию их оптимальной производственной мощности в зависимости от себестоимости добычи полезного ископаемого и горной массы, значений коэффициента вскрыши и относительного показателя, равного отношению любой назначенной скорости понижения горных работ в карьере к ее максимальному значению.

Ключевые слова: месторождения алмазов; производительность алмазородных карьеров; мощность; скорость понижения горных работ; эффективность инвестиций.

На современном этапе развития горного производства выбор производственной мощности карьера и обоснование сроков его существования являются одними из основных вопросов, от которых зависит экономически эффективная разработка месторождения и функционирование предприятия.

Под производственной мощностью горнодобывающего предприятия (карьера) понимают установленную проектом максимально возможную добычу полезного ископаемого требуемого качества в единицу времени (сутки, месяц, год). При проектировании карьера его проектную производительность определяют по полезному ископаемому, вскрыше и горной массе.

Задача определения производственной мощности карьера подразделяется на две части:

- определение максимально возможной производительности карьера по горнотехническим условиям;
- определение оптимальной или экономически целесообразной производительности; при этом максимально возможная производительность по горнотехническим условиям рассматривается как верхний ограничивающий предел.

Основными ограничивающими горнотехническими факторами, определяющими максимально возможную производственную мощность карьера, являются: интенсивность развития горных работ; провозная способность транспортных

Кантемиров Валерий Данилович – кандидат технических наук, заведующий сектором управления качеством минерального сырья. 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: ukrkant@mail.ru

Титов Роман Сергеевич – старший научный сотрудник сектора управления качеством минерального сырья. 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: ukrigd15@mail.ru

Яковлев Андрей Михайлович – старший научный сотрудник сектора управления качеством минерального сырья. 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: ukrigd15@mail.ru

коммуникаций; мощность парка горнотранспортного оборудования и наличие фронта горных работ.

Фактор интенсивности развития горных работ при разработке наклонных и крутопадающих залежей, характерных для глубоких карьеров, оценивают через скорость понижения (углубки) горных работ; также при установлении производственной мощности карьера по горнотехническим возможностям обязательно необходимо оценивать и учитывать скорость подвигания горных работ в горизонтальном направлении.

Таблица 1

Проектные параметры карьеров «Юбилейный» и «Удачный» АК «АЛРОСА»

Карьер	Срок отработки	Глубина, м	Размер, м		Угол наклона бортов, град	Производительность	
			по поверхности	по дну		по руде, млн т	по вскрыше, млн м ³
Юбилейный	1984–2035	720	2000×1260	515×250	43–48	11,5	15
Удачный	1971–2015	640	2020×1530	660×230	59–63	8,5	24

Существует значительное количество методов обоснования необходимой производственной мощности карьера по полезному ископаемому с учетом геологических данных, горнотехнических и экономических факторов. Критериями оценки динамических горно-экономических задач являются чистый дисконтированный доход, индекс доходности инвестиций, внутренняя норма доходности инвестиций, срок их окупаемости [1].

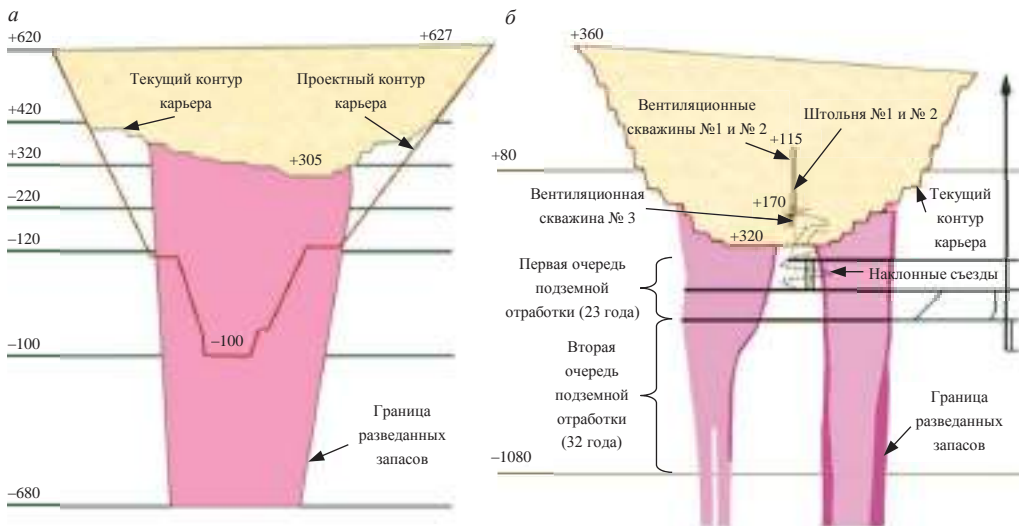


Рис. 1. Схемы отработки алмазных трубок: а – Юбилейная; б – Удачная

Для глубоких карьеров с относительно небольшими размерами в плане выбор оптимальной производственной мощности и срока существования в зависимости от скорости понижения горных работ (углубки) карьера является актуальной задачей. Примером таких горнодобывающих предприятий являются карьеры, разрабатывающие алмазоносные кимберлитовые трубки на севере Республики Саха (Якутия) предприятием АК «АЛРОСА».

Сектор управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН (ИГД УрО РАН) разработал *Методические указания по обоснованию*

мощности и срока существования алмазородных карьеров, основные положения которых вошли в национальный стандарт РФ по разработке алмазородных карьеров в криолитозоне.

Кимберлитовые трубки имеют вертикальные или близкие к вертикальным рудные тела, которые обрабатываются глубокими карьерами – до 720 м [2] (рис. 1, табл. 1).

Производительность карьера по вскрыше в течение всего срока эксплуатации должна обеспечивать стабильную производительность по руде и неснижаемый норматив подготовленных запасов.

Оценка возможной оптимальной производственной мощности карьера производится в увязке со скоростью понижения горных работ и сроком существования карьера.

Таблица 2

Проектная производительность карьера «Юбилейный» АК «АЛРОСА» по горнотехническим условиям

Проектные данные				Расчетная скорость понижения горных работ при постоянной производительности карьера по руде	
Интервал глубины, абс. отм., м	S , тыс. м ²	h_r , м/год	A_p , тыс. т/год	A_p , тыс. т/год	h_r , м/год
+400...+300	151,8	22,3	9381,3	5600	15
+300...+200	164,9	22,3	1019,2	5600	14
+200...+100	113,5	22,3	7018,1	5600	21
+100...0	71,0	22,3	4386,4	5600	33
0...-100	48,4	22,3	2992,9	5600	48
<i>Средние значения</i>					
+400...-100	104,6	22,3	5600	5600	22

Для вычисления среднегодовой производственной мощности карьера предлагается использовать следующую формулу:

$$A_p = h_r S \eta_0 (1 + Z_0) \gamma,$$

где h_r – среднегодовое понижение добычных работ, м/год; S – средняя площадь рудного тела, м²; η_0 – коэффициент извлечения руды, доли ед.; Z_0 – коэффициент разубоживания, доли ед.; γ – объемная масса руды, т/м³.

Максимально возможная скорость развития горных работ в глубину и в плане влияет на интенсивность разработки месторождения. За сопоставимый показатель интенсивности разработки может быть принята среднемесячная величина вскрываемой площади, м²/мес:

$$F_m = L_\phi \cdot v_\phi,$$

где L_ϕ – средняя протяженность фронта работ уступа, м; v_ϕ – среднемесячная скорость подвигания фронта работ, м/мес.

Интенсивность разработки месторождения зависит от горно-геологических условий и физико-механических свойств разрабатываемых пород. При этом отсутствует ограничение по числу единиц используемого оборудования, т. е. оно может быть максимально возможным.

Интенсивность развития горных работ при разработке наклонных и крутопадающих залежей характеризуется скоростью понижения горных работ [3]. Горизонт (группа горизонтов), на котором скорость продвижения уступа будет наименьшей

по сравнению с другими при расстановке на каждом горизонте максимально возможного количества экскаваторов, называется ограничивающим.

Для предварительных расчетов среднегодовое понижение добычных работ алмазородных карьеров следует принимать по нормам технологического проектирования (*Ведомственные нормы технологического проектирования (ВНТП 35-86). Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий цветной металлургии с открытым способом разработки. М., 1986. 56 с.*).

Таблица 3

Исходные данные для расчета производственной мощности карьеров «Юбилейный» и «Удачный»

Показатель	Юбилейный	Удачный
Максимальное расчетное понижение горных работ h_{\max} , м/год	28,4	31,2
Принятое значение годовой производительности экскаватора (ЭКГ-15 и ЛЕВHERR R9350), тыс. м ³ /год	1996–4169	2000–3800
Средняя минимальная длина экскаваторного блока (при автомобильном транспорте для соответствующего экскаватора), м	1000–1200	1200–1500
Высота уступа, м	15	15
Средний угол откоса рабочего борта карьера, град	15	18
Средний угол направления углубки карьера (или угол падения залежи), град	80	78
Средняя площадь рудного тела в проектном карьере S , тыс. м ²	104,6	7,4
Геологические запасы на 01.01.2014 г. руды, млн т	172	4,78
Средний объемный вес руды γ , т/м ³	2,4	2,5
Коэффициент извлечения руды из недр, доли ед.	0,99	0,74
Коэффициент разубоживания руды, доли ед.	0,02	0,35
Себестоимость добычи 1 м ³ полезного ископаемого, р./м ³	1781,7	1781,7
Себестоимость на 1 м ³ вынутых пустых пород, р./м ³	266,1	266,1
Средний коэффициент вскрыши, м ³ /т	1,22	0,32
Добыча руды, тыс. м ³	11 140,0	1433,7
Вскрыша, тыс. м ³	2285,3	1500,0
<i>Средняя стоимость основных фондов, млн р.:</i>		
Рекультивация нарушенных земель		127,4
Здания		228,3
Сооружения, передаточные устройства		4138,8
Машины и оборудование		2252,1
Транспортные средства		82,3
Инвентарь производственный и хозяйственный		0,93
Всего фондов, млн р.		6829,8
Средние удельные капиталовложения, р./м ³		2285,3
Средняя стоимость удаления вскрышных пород, не зависящая от периода амортизации, р./м ³		124,0

Среднегодовое понижение добычных работ, м/год, следует определять по формуле:

$$h_r = h_c + \Delta h,$$

где h_c – базовая среднегодовая скорость понижения добычных работ (определяется по *таблице 1* ВНТП 35-86), м/год; Δh – поправка при использовании автомобильного транспорта (определяется по *таблице 2* ВНТП 35-86), м/год.

При проектировании рекомендуется определять предел производительности и срок службы карьера путем сравнения вариантов, рассчитанных для разных значений среднегодового понижения добычных работ. Лучшим считается вариант, обеспечивающий наибольшую производительность по руде при себестоимости добычи меньше или равной показателям карьера-аналога [4].

Цена на готовую продукцию устанавливается по данным рыночных исследований, себестоимость получения готовой продукции – по данным предприятий с аналогичными технологиями обогащения. Экономической оценке подвергаются календарные графики ведения горных работ, каждый из которых по сроку отработки и среднему коэффициенту вскрыши соответствует конкретной заданной глубине разработки.

Таблица 4

Результаты расчета технико-экономических показателей по карьерам
«Юбилейный» и «Удачный»

λ , м/год	h_i , м/год	A_p^i		V , млн м ³ /год	k , м ³ /м ³	T , год	C_A , р./м ³	C , р./м ³
		млн т/год	млн м ³ /год					
Карьер «Юбилейный»								
1,0	28,4	7,3	3,0	11,3	3,7	24	96,3	2602,7
0,8	22,7	5,8	2,4	9,0	3,7	30	77,0	2530,9
0,6	17,1	4,4	1,8	6,8	3,7	40	57,8	2459,2
0,4	11,4	2,9	1,2	4,5	3,7	59	38,5	2387,4
0,2	5,7	1,5	0,6	2,3	3,7	119	19,3	2315,6
Карьер «Удачный»								
1,0	31,2	0,6	0,20	0,24	1,1	8	574,7	2512,8
0,8	24,9	0,5	0,18	0,20	1,1	10	459,8	2392,5
0,6	18,7	0,4	0,10	0,14	1,1	14	344,8	2272,2
0,4	12,5	0,2	0,09	0,10	1,1	21	229,9	2152,0
0,2	6,2	0,1	0,05	0,05	1,1	41	115,0	2031,7

Экономически целесообразную производительность карьера и срок отработки месторождения следует находить исходя из максимума чистого дисконтированного дохода при отработке балансовых запасов алмазоносной кимберлитовой руды и других показателей, характеризующих разновременность затрат и доходов. Признаком рациональности календарного графика отработки является срок окупаемости вложений, не превышающий $0,5T$, где T – срок службы карьера, лет. Расчет чистого дисконтированного дохода осуществляется при заранее обоснованном коэффициенте дисконтирования, который косвенно характеризует экономический риск реализации оцениваемых решений [5].

В табл. 2 по карьере «Юбилейный» АК «АЛРОСА» представлены проектные значения скорости понижения горных работ и расчетные данные, полученные из условия поддержания постоянной производительности карьеров с учетом глубины зоны отработки и площади рудного тела. Результаты расчетов показывают, что для поддержания постоянной производительности карьера по руде при понижении и сокращении фронта горных работ необходимо последовательно увеличивать скорость понижения горных работ h_r , что не всегда оправданно экономически.

С помощью предложенной методики на примере карьеров «Юбилейный» и «Удачный» выполнены расчеты оптимальной мощности A_p^i , скорости пониже-

ния горных работ h_p , срока службы карьера T в увязке с себестоимостью добычи 1 м^3 полезного ископаемого C_A и полной себестоимостью выемки 1 м^3 горной массы C при соответствующих значениях коэффициента вскрыши k и сравнительного показателя скорости понижения горных работ, равного отношению любой назначенной скорости понижения горных работ в карьере к ее максимальному значению $\lambda = h_i / h_{\text{max}}$ [6]. Значения сравнительного показателя скорости понижения горных работ λ в расчетах приняты в интервале от 0,2 до 1. Исходные данные и результаты расчетов (в ценах 2015 г.) представлены в табл. 3, табл. 4.

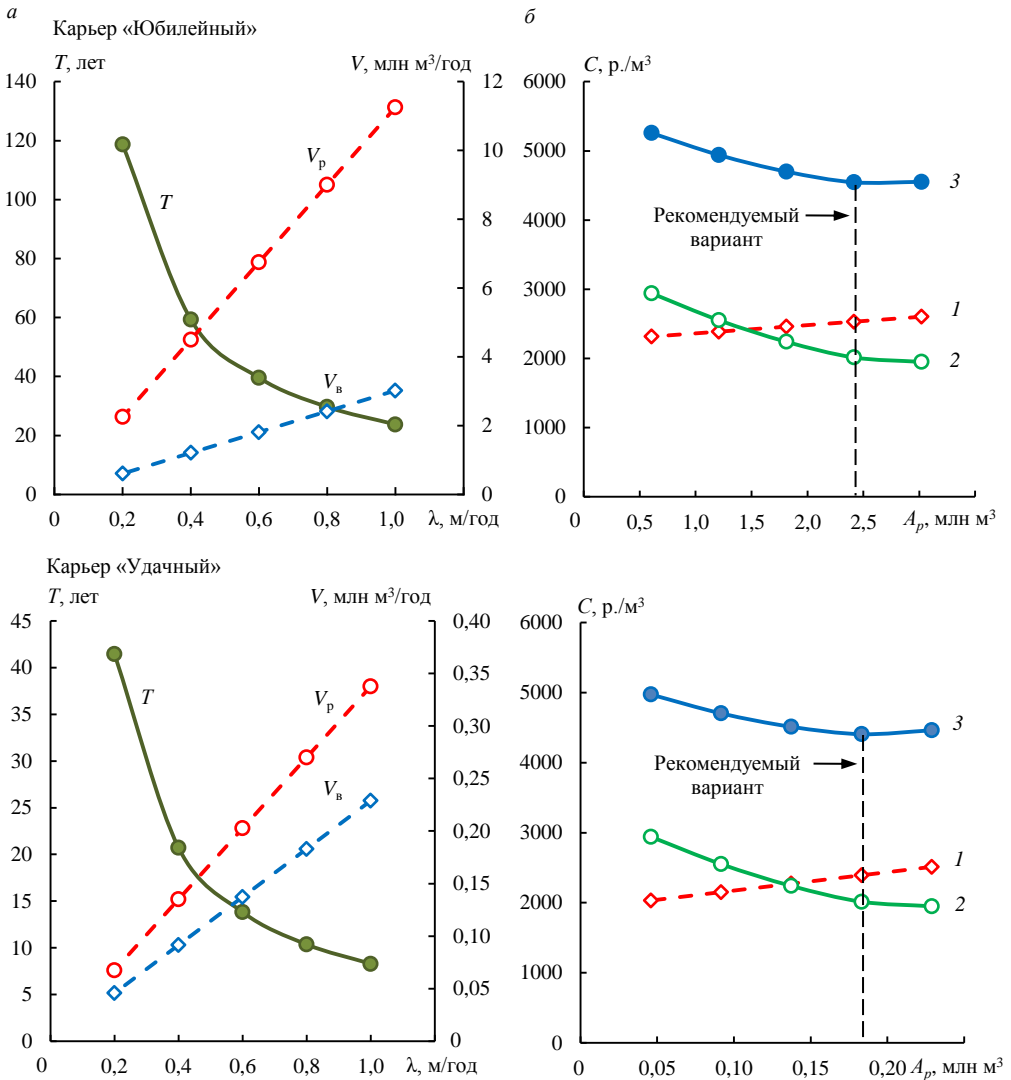


Рис. 2. Зависимости:

a – продолжительности работы карьера T , объемов добычи руды V_p и вскрыши V_b от сравнительного показателя скорости понижения горных работ λ ; *b* – стоимости добычи 1 м^3 руды C от производственной мощности карьера A_p ; 1 – расчетные данные; 2 – данные Института «Якутнипроалмаз»; 3 – суммарные значения расчетных данных Института «Якутнипроалмаз»

На рис. 2, *a* приведены расчетные зависимости продолжительности работы карьеров «Юбилейный» и «Удачный», объемов добычи руды и вскрыши от λ , на рис. 2, *b* – зависимости стоимости добычи 1 м^3 руды C от производственной мощ-

ности карьера A_p , позволяющие предварительно выбирать оптимальную мощность карьера.

При сравнении вариантов планируемой мощности карьера рекомендуется учитывать статистические данные предприятия о технико-экономических показателях эксплуатации алмазородных карьеров (карьеро-аналогов) [7]. Приемлемый вариант определяется минимумом суммы себестоимости, полученной расчетным путем, и фактической – карьера-аналога.

Предлагаемая методика выбора оптимальной мощности, скорости понижения горных работ и срока существования алмазородных карьеров, утвержденная в национальном стандарте РФ, позволит специалистам горного дела в условиях динамично изменяющегося рынка существенно упростить технологию принятия решений по освоению месторождений алмазов, а также оптимизировать количество рассматриваемых вариантов на стадии предпроектной проработки и тем самым сократить сроки и объемы проектных работ.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания 007-00293-18-00, тема № 0405-2018-0015.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корнилов С. В., Лаптев Ю. В., Кантемиров В. Д. Стратегия освоения месторождений твердых полезных ископаемых Приполярного Урала // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 6. С. 11–17.
2. Акишев А. Н., Колганов В. Ф., Зырянов И. В. Классификация кимберлитовых месторождений на основе новых аналитических критериев // Горный журнал. 2014. № 9. С. 78–81.
3. Арсентьев А. И. Производительность карьеров. СПб: Санкт-Петербургский горный ин-т, 2002. 85 с.
4. Моссаковский Я. В. Экономика горной промышленности. М.: Горная книга, 2015. 525 с.
5. Методические рекомендации при оценке инвестиционных проектов. М.: Экономика, 2000. 422 с.
6. Холодняков Д. Г. Определение предела производительности карьера, обеспечивающего эффективность разработки месторождения // Горная промышленность. 2014. № 3 (115). С. 91–92.
7. Яковлев В. Л., Аленичев В. М. Обоснование концептуальных положений для определения мощности и срока существования карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 2. С. 4–13.

Поступила в редакцию 5 марта 2018 года

SUBSTANTIATION OF OPTIMUM PRODUCTION CAPACITY OF DEEP KIMBERLITE PIPES

Kantemirov V. D., Titov R. S., Iakovlev A. M. – The Institute of Mining, the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: ukrkant@mail.ru

Basic approaches to the substantiation of deep open-pits production capacity are stated. By the example of Alrosa PJSC open-pits, basic design parameters, criteria and factors which determine the choice of production capacity of a diamond mine in conditions of cryolithozone are introduced. For the mining conditions of diamond kimberlite deposits opencast mining, analytical dependences for the calculation of capacity and life span of a mine are studied and introduced; the influence of the mining depth increase speed on the capacity of mines is reflected. Calculation results are introduced on the preliminary substantiation of Alrosa PJSC deep open-pits production capacity depending on the intensity of mining depth increase and some economic factors. For Yubileyny and Udachny open-pits, calculations on the substantiation of their optimum production capacity are fulfilled depending on the production cost of the mineral and rock mass, stripping ratio value, and the relative ratio equal to the relation of any designated speed of mining depth increase in an open-pit to its maximum value.

Key words: diamond deposits; diamond deposits capacity; production capacity; mining depth increase speed; return of investment.

REFERENCES

1. Kornilov S. V., Laptev Iu. V., Kantemirov V. D. [Development strategy of the fields of solid minerals of the pre-polar Urals]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2013, no. 6, pp. 11–17. (In Russ.)
2. Akishev A. N., Kolganov V. F., Zyrianov I. V. [Classification of kimberlite deposits on the basis of some new analytical criteria]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2014, no. 9, pp. 78–81. (In Russ.)

3. Arsent'ev A. I. *Proizvoditel'nost' kar'erov* [Open-pits capacity]. St. Petersburg, Saint-Petersburg Mining University Publ., 2002. 85 p.
 4. Mossakovskii Ia. V. *Ekonomika gornoj promyshlennosti* [Mining industry economics]. Moscow, Gornaia kniga Publ., 2015. 525 p.
 5. Methodological recommendations under the estimation of investment projects. Moscow, Ekonomika Publ., 2000. 422 p. (In Russ.)
 6. Kholodniakov D. G. [Determination of an open-pit performance limit, which provides efficient deposit exploitation]. *Gornaia promyshlennost' – Mining Industry Journal*, 2014, no. 3 (115), pp. 91–92. (In Russ.)
 7. Iakovlev V. L., Alenichev V. M. [Substantiation of conceptual conditions to determine capacity and operation time of an open pit]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 2, pp. 4–13. (In Russ.)
-