ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Экономика сырьевых отраслей*

Обоснование оптимальных технико-экономических параметров карьера при этапной разработке рудных крутопадающих месторождений

С.И.Фомин, М.П.Овсянников✉
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Фомин С.И., Овсянников М.П. Обоснование оптимальных технико-экономических параметров карьера при этапной разработке рудных крутопадающих месторождений // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 157-166. EDN BZBJPE. DOI: 10.31897/PMI.2022.73

Аннотация
Применение этапных схем при разработке глубоких карьеров – это один из способов увеличения экономической эффективности отработки месторождения, а определение оптимальных параметров этапа остается актуальной задачей. Такими параметрами являются глубина этапа, высота уступа, длина блока и т.д., однако существует большой диапазон значений этих параметров. Поэтому для выбора оптимальных значений и оценки эффективности проектных решений целесообразно использовать величину чистого дисконтированного дохода или net present value, которая является международным аналогом. В результате анализа данных по месторождениям можно выделить большое количество переменных показателей, предположительно влияющих на эффективность отработки. В статье предлагается все параметры отработки карьера разделять на два типа: горно-технические и экономические. Важность каждого из них определяется по степени влияния на величину чистого дисконтированного дохода. Так, для оценки степени влияния показателей отработки принимаются средние значения каждого из них, и в результате попеременной смены одного исследуемого параметра оценивается степень его влияния на получаемую сумму дисконтированного дохода. Результаты анализа значимых факторов, их оценка и сравнительный анализ являются важными показателями, существенно влияющими на принимаемые проектные решения и эффективность инвестиционного проекта.

Ключевые слова
рудные крутопадающие месторождения; этапный способ; временно нерабочий борт; ЧДД; чистый дисконтированный доход; анализ значимых факторов

Поступила: 02.06.2022 ***Принята: 21.07.2022*** ***Онлайн: 05.10.2022*** ***Опубликована: 27.02.2026***

Введение

В условиях волатильного и динамически меняющегося рынка минерального сырья горно-добывающие предприятия, отрабатывающие глубокие крутопадающие месторождения с постоянной производительностью, вынуждены адаптироваться к возрастающим требованиям. Одним из способов повышения эффективности отработки являются этапные схемы отработки с формированием временно нерабочего борта [1].

Большой потенциал в области улучшения существующих технологий открытых горных работ и повышения их экономической эффективности заключается в способе консервации части вскрышных горных пород и создании в пределах контура карьерного поля временно нерабочей зоны, что позволит уменьшить объемы горно-капитальных работ и сократить количество вскрышных работ на начальных этапах функционирования карьера.

Проектирование карьеров этапами, в рамках каждого из которых устанавливается промежуточный контур, целесообразно использовать для минимизации экономических затрат [2]. Важной задачей является определение параметров этапа [3, 4]. Эффективность этапного способа отработки зависит от возможности реализации режима горных работ, который позволит обеспечить требуемый объем и качество продукции при минимизации уровня затрат на добычу [5]. Это связано прежде всего с тем, что от режима горных работ зависят конструктивные и технологические параметры карьера и, как следствие, технико-экономические показатели отработки в целом.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 157-166 DOI: 10.31897/PMI.2022.73
© С.И.Фомин, М.П.Овсянников, 2022

Отработка карьера этапами характеризуется порядком ведения горных работ, при котором в рабочей зоне формируется целик – временно нерабочий борт (ВНБ), что способствует поэтапному росту объемов вскрышных работ во времени. Сформированный целик можно использовать не только в этапных схемах отработки, но и в рамках одного эксплуатационного временного промежутка. В таком случае во время формирования временно нерабочего борта, когда происходит сокращение длины рабочей зоны, проводятся работы по ликвидации целика на верхних горизонтах нерабочего борта [6].

Постановка проблемы

При выборе вариантов расположения контуров этапов на месторождении следует учитывать множество экономических, горно-геологических и горно-технических факторов. Применение этапных схем успешно реализуется на крупных рудных крутопадающих месторождениях: Малый Куйбас, карьерах Оленегорский, Сарбайский и др.

Предлагаемый способ отработки можно применять на группах карьеров, которыми разрабатываются изолированные рудные крутопадающие залежи, или на вытянутых по простиранию карьерах с разделением рабочей площади на два участка.

На каждом из выделяемых участков предлагается вести добычные работы поочередно. Пока на очередном участке ведутся добычные работы, на втором выполняются работы по разносу временно нерабочего борта и переходу к следующему этапу отработки. Схема порядка отработки представлена на рис.1.

Горные работы на месторождении начинаются на южном участке, обозначенном цифрой I. Во время первого периода эксплуатации отрабатываются все запасы контура T_1. Следующий временной промежуток T_2 характеризуется началом добычных работ на северном участке (II). В то же время на южном участке ведутся работы по разносу временно нерабочего борта. После окончания периода T_2 добычные работы возобновляются на участке I, а на участке II начинаются работы по ликвидации целика и т.д. Аналогичным способом отрабатывается все месторождение.

Пока на отрабатываемом этапе одного из участков ведутся работы по добыче полезного ископаемого, на втором участке породный борт подвигается от границ ранее отработанного до границ следующего этапа. Во время подвигания ВНБ из текущего положения в границы нового этапа в зоне

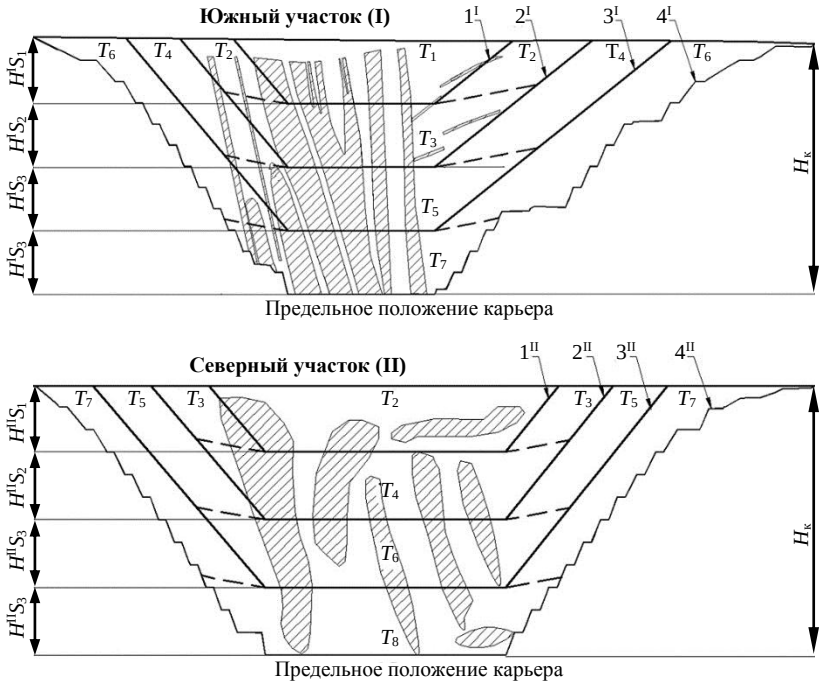


Рис.1. Порядок отработки этапами карьера, разделенного на два участка

T_n – период отработки месторождения; $H^{I}S_n$, $H^{II}S_n$ – глубина этапа первого и второго участка соответственно; 1^{I}-4^{I} – границы этапов участков; $H_к$ – глубина карьера на конец отработки

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.73

© С.И.Фомин, М.П.Овсянников, 2022

добычи полезного ископаемого создается участок рабочего борта с рабочими площадками на каждом горизонте. Это позволяет обеспечить свободный доступ к отработке запасов полезных ископаемых следующего этапа [1, 7, 8]. Погашение нерабочего борта карьера очередного отрабатываемого этапа следует проводить после отработки всех запасов в контуре этапа, таким образом угол откоса ВНБ может достигать проектного угла откоса борта карьера на конец его отработки.

Каждый новый отрабатываемый этап должен иметь бóльшую глубину, чем предыдущий (отработанный) этап. Выполнение этого условия позволит обеспечить бесперебойную добычу полезного ископаемого на месторождении при одинаковых вертикальной скорости разноса ВНБ и скорости углубки на обоих выделенных участках месторождения.

Поскольку по предложенной схеме отработки в границах этапа угол откоса рабочего борта карьера может значительно возрастать, становится возможной консервация больших объемов вскрыши. Перенос работ по выемке вскрыши на будущие периоды дает возможность увеличить производительность месторождения по полезному ископаемому, что позволяет повысить эффективность отработки в рыночных условиях волатильности цен и переменного спроса на сырье [2, 9].

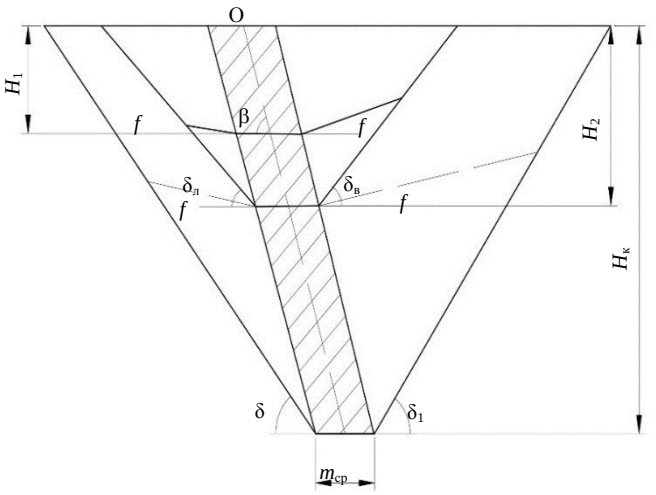


Рис.2. Схема развития рабочей зоны карьера при отработке крутопадающего рудного месторождения этапами

H_1, H_2 – глубина первого и второго этапа, м; β – угол падения рудного тела, град; $\delta_л$, $\delta_в$ – угол наклона временно нерабочего борта со стороны лежачего и висячего боков залежи, град; δ, δ_1 – угол наклона борта карьера в конечном положении, град; *f* – угол наклона рабочего борта с рабочими площадками нормальной ширины, град; $m_{ср}$ – мощность рудного тела, м; О – ось падения рудного тела

Календарный план развития вскрышных и добычных работ при разработке месторождения, отрабатываемого без выделения этапов, как правило, содержит один основной период нормальной эксплуатации, который характеризуется стабильными годовыми объемами полезного ископаемого и вскрышных пород. В случае, если месторождение разрабатывается очередями или с использованием временно нерабочих бортов, то календарный план в графическом выражении имеет ступенчатую форму (число ступеней соответствует числу пространственных этапов развития карьера).

Рост спроса на минеральное сырье обусловливает (в случае выделения этапов или без них) ведение добычных работ с максимальной интенсивностью, поэтому увеличение производительности карьера возможно лишь в случае увеличения вовлекаемой в отработку площади рудного тела [4].

Продолжительность этапа разработки целесообразно принимать максимально возможной при коэффициенте вскрыши этого периода меньшим, чем коэффициент вскрыши последующего периода. Поэтому наиболее эффективным является вариант отработки с максимальной продолжительностью первого календарного этапа.

Во время создания аналитической модели развития карьерного пространства при отработке в два этапа контур карьера и рудное тело целесообразно рассматривать в виде упрощенных геометрических правильных фигур (рис.2). Залежь полезного ископаемого с простыми условиями залегания с достаточной степенью точности приводится к правильной форме с помощью построения крутопадающего рудного тела по средним значениям истинной мощности и угла падения рудного тела [5, 10-12].

Поэтапная отработка карьерного поля в пределах конечных границ карьера предполагает широкий диапазон возможных значений глубины первого этапа.

Для экономической оценки инвестиционного проекта следует использовать величину чистого дисконтированного дохода от реализации проекта отработки месторождения [13, 14]

$$ЧДД = \sum_{t=0}^{T}(R_t - З_t)\frac{1}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T_и}К(1+E).$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 157-166 DOI: 10.31897/PMI.2022.73
© С.И.Фомин, М.П.Овсянников, 2022

Распишем разность денежных потоков

$$R_t - З_t = ЦA_р - CA_р, \quad (1)$$

где R_t – результаты, достигаемые на t-м этапе реализации проекта, руб.; $З_t$ – затраты на t-м этапе реализации проекта, руб.; Ц – цена руды, руб./м^3; С – себестоимость руды, руб./м^3; $A_р$ – производительность карьера по полезному ископаемому, м^3/год.

Себестоимость добычи руды определяется по формуле:

$$С = С_д + K_в C_в,$$

где $С_д$ – удельные эксплуатационные затраты на собственную добычу 1 т руды (без вскрышных работ), руб./т; $С_в$ – удельные эксплуатационные затраты на 1 м^3 (1 т) вскрыши, руб./м^3 (руб./т); $K_в$ – текущий коэффициент вскрыши, м^3/т (м^3/м^3, т/т).

Формула ЧДД с подставленными из уравнения (1) значениями:

$$ЧДД = \sum_{t=0}^{T}\left(ЦA_р - CA_р\right)\frac{1}{(1+E)^t} - К,$$

где К – капитальные затраты на реализацию проекта, руб.; E – норма дисконта; T – время отработки; t – год.

Производительность карьера по полезному ископаемому определяется по следующей формуле [15]:

$$A_р = h_0 h L_{бл}\left(\mathrm{ctg}\varphi + \mathrm{ctg}\beta\right)\frac{1-\eta}{1-\rho}, \quad (2)$$

где φ – угол откоса рабочего борта карьера, град.; h – высота уступа, м; h_0 – скорость углубки, м/год; $L_{бл}$ – длина фронта работ, приходящегося на экскаватор, м; β – угол углубки, град; η – показатель потерь руды; ρ – показатель разубоживания руды.

Угол углубки [16]

$$\beta = \mathrm{arctg}\frac{B + h\mathrm{ctg}\alpha}{h},$$

где B – нормативная ширина рабочих площадок, м; α – угол откоса уступа, град.

Подставив все полученные зависимости в исходную формулу, получим значение чистого дисконтированного дохода от разработки месторождения:

$$ЧДД = \sum_{t=0}^{T}(Ц - С)\left(h_0 h L_{бл}\mathrm{ctg}\varphi + \left(\mathrm{arctg}\frac{B + h\mathrm{ctg}\alpha}{h}\right)\right)\frac{1-\eta}{1-\rho} - \sum_{t=1}^{T_и} К(1+E).$$

Как правило, глубокие рудные карьеры отрабатываются на протяжении очень длительного периода времени. Так, в течение его функционирования реализуются реинвестиционные вложения капитала [17-19]. Инвестирование представляет собой поток капитальных вложений денежных средств в строительство рудника и поток дохода в результате эксплуатации, которые дисконтируются по принятой процентной ставке (i).

Под чистым дисконтированным доходом могут понимать чистую текущую стоимость проекта, суммарную дисконтированную прибыль или чистую прибыль инвестиционного проекта. В мировой практике чистый дисконтированный доход принято называть net present value (NPV). Он используется в качестве основного инструмента оценки экономический эффективности проектных решений. Методики расчета NPV и ЧДД близки между собой и учитывают все статьи расходов и доходов предприятия, что подтверждается справочными источниками [20, 21]. Таким образом, в дальнейших расчетах использовался общепринятый международный символ NPV. Для корректной оценки проекта при помощи критерия чистого дисконтируемого дохода необходимо выбрать ставку дисконтирования, временной период оценки, а также формулы определения NPV.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Методики расчета могут отличаться наличием или отсутствием в формуле остаточной стоимости проекта, которую путем дисконтирования приводят к моменту начала планирования. Величина NPV показывает только качество чистого денежного потока от реализации проекта при принятой ставке дисконтирования.

При сравнении разных вариантов реализации инвестиционных проектов необходимо учитывать риск потери денежных средств, который определяется вероятностью изменения процентной ставки [3, 22, 23]. Этот риск характеризуется возможными потерями капитала из предполагаемого процентного выигрыша и рассчитывается как разница между внутренней нормой рентабельности ($IRR_{\text{пи}}$) и ставкой доходности, вычисляемой из равенства дисконтированных капитальных вложений потоку дисконтированного дохода за вычетом его в период окупаемости капитальных вложений [24]

$$\sum_{j=1}^{-T} NC_j \left(1+i_R\right)^{-n} - \sum_{j=1}^{T_{\text{ок}}} NC_j \left(1+i_R\right)^{-n} - \sum_{t=1}^{T_{\text{и}}} I_t \left(1+i_R\right)^{-n} = 0,$$

где $T_{\text{ок}}$ – период окупаемости капитальных вложений по ставке i; I_t – величина инвестиций в проектирование, строительство и эксплуатацию карьера в t-й год; NC_j – чистая текущая прибыль от разработки карьера в j-й год; i_R – ставка доходности; n – порядковый номер года оценки.

Процентная ставка реинвестирования [21]

$$R = IRR_{\text{пи}} - i_R.$$

Чистая текущая стоимость проекта (с учетом реинвестиции) – это динамическая величина оценки эффективности капиталовложений в разработку карьера с учетом процентов без рисков потери инвестиций [25, 26].

Чистая текущая стоимость реализации проекта с учетом приращения дохода с момента его появления по процентной ставке реинвестирования

$$\text{NPV}_R = \sum_{j=1}^{T} NC_j \frac{\left(1+R\right)^{nT_{\text{c}}}}{\left(1+i\right)^{n}} - \sum_{t=1}^{T_{\text{c}}} I_t \left(1+i\right)^{-n}, \tag{3}$$

где T_{c} – срок строительства карьера, лет.

Для учета изменения ценностей инвестиций используют дисконтирующий фактор, необходимый для приведения разновременных экономических величин к единому моменту времени [21, 25],

$$q^{-n} = \left(1+i\right)^{-n}.$$

Каждый вариант разделения карьерного поля на этапы разработки вследствие сложной зависимости параметров и показателей горных работ от глубины этапа $H_{\text{э}}$ характеризуется получением различных значений чистой текущей стоимости реализации проекта NPV [27].

Методология исследования

Для оценки чувствительности NPV к изменению показателей рассмотрим период отработки карьера в пределах одного этапа путем преобразования формулы (3):

$$\text{NPV} = \sum_{j=1}^{T_1} NC_j \, q_j^{-n} - \left(\sum_{\omega=1}^{T_{\text{и}}} K_\omega \, q_\omega^{-n} + \sum_{m=1}^{T_{\text{ир}}} K_m \, q_m^{-n} \right) \to \max. \tag{4}$$

Чистая текущая прибыль определяется при помощи формулы (2):

$$NC = A\left(\text{Ц} - \text{С}\right). \tag{5}$$

Запишем формулу (5), подставив значение величины производительности карьера из формулы (2),

$$NC = h_0 h L_{\text{бл}} \left(\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\left(\text{arctg}\, \frac{B + h\text{ctg}\alpha}{h} \right) \right) \frac{1-\eta}{1-\rho} \left(\text{Ц} - \text{С}\right).$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 157-166 DOI: 10.31897/PMI.2022.73
© С.И.Фомин, М.П.Овсянников, 2022

Скорость углубки этапа определяется как отношение глубины этапа ко времени его отработки

$$h_0 = \frac{H_э}{T_n},$$

где T_n – время отработки этапа, год.

Подставив все полученные зависимости в формулу (4), вычислим критериальный показатель для определения NPV для первого этапа отработки:

$$\text{NPV} = \sum_{j=1}^{T_1} \frac{H_э}{\text{T}_j} hL_{бл} \left(\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\left(\text{arctg}\frac{B + h\text{ctg}\alpha}{h} \right) \right) \frac{1-\eta}{1-\rho} (\text{Ц} - \text{С}) q_j^{-n} - \left(\sum_{\omega=1}^{T_и} K_\omega q_\omega^{-n} + \sum_{m=1}^{T_{ир}} K_m q_m^{-n} \right), \quad (6)$$

где Ц – цена рудного концентрата, руб./т; С – себестоимость добычи руды и производства рудного концентрата руб./т; $q_j^{-n} = (1+i)^{-n}$ – дисконтирующий фактор чистой текущей прибыли первого этапа отработки карьера в j-й год; $q_\omega^{-n} = (1+i)^{-n}$ – дисконтирующий фактор инвестиций в строительство карьера в ω-й год; $q_m^{-n} = (1+i)^{-n}$ – дисконтирующий фактор инвестиций в реконструкцию с целью перехода ко второму этапу отработки в m-й год; K_ω – величина инвестиций в строительство карьера в ω-й годы; K_m – величина инвестиций в реконструкцию с целью перехода ко второму этапу отработки в m-й год.

По результатам обобщения и анализа данных по карьерам и месторождениям-аналогам приняты величины диапазонов изменения исследуемых горнотехнических и экономических факторов. Для определения степени значимости исследуемых факторов на величину NPV оценим диапазон изменения каждого из факторов (см. таблицу).

Исходные данные для анализа чувствительности технико-экономических параметров и показателей-аргументов на величину NPV

Параметр	Диапазон изменения	Среднее значение	Приращение
Высота уступа h, м	12-19	15	1
Длина фронта работ $L_{бл}$, м	1200-2600	1800	200
Ширина рабочей площадки B, м	30-65	45	5
Угол откоса рабочего борта карьера φ, град	12-19	15	1
Потери руды η	0,02- 0,048	0,032	0,004
Разубоживание руды ρ	0,01-0,15	0,07	0,02
Угол откоса уступа, град α	50- 85	65	5
Глубина этапа $H_э$, м	70-210	130	20
Время отработки этапа T_j, год	11-18	14	1
Цена рудного концентрата Ц, руб./т	200000-270000	250 000	10 000
Себестоимость добычи руды и производства рудного концентрата С, руб./т	30000-65000	47 500	5 000
Дисконтирующий фактор чистой текущей прибыли первого этапа отработки карьера в j-й год q_j, д.ед.	0,287-0,13	0,205	–
Дисконтирующий фактор инвестиций в строительство карьера в ω-й год q_w, д.ед.	0,893-0,404	0,636	–
Дисконтирующий фактор инвестиций в реконструкцию с целью перехода ко второму этапу отработки в m-й год q_m, д.ед.	0,567-0,257	0,404	–
Величина инвестиций в строительство карьера K_w, млн руб.	10 000-17 000	13 000	1 000
Величина инвестиций в реконструкцию с целью перехода ко второму этапу отработки K_m, млн руб.	300-1000	600	100

При вычислении зависимости (6) используем средние значения показателей

$$\text{NPV} = \frac{130}{14} \cdot 15 \cdot 1800 \left(\text{ctg}15° + \text{ctg}\left(\text{arctg}\frac{45 + 15\text{ctg}65°}{15} \right) \right) \frac{1-0,032}{1-0,07} \times$$

$$\times (250000 - 47500) 0,205 - (13000000000 \cdot 0,636 + 60000000 \cdot 0,404) = 40.$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.73

© С.И.Фомин, М.П.Овсянников, 2022

Далее аналогичным образом подставляем средние значения всех рассматриваемых факторов, изменяя только значения исследуемого аргумента. Таким образом, меняя значение одного из параметров, можно оценить степень влияния каждого показателя на величину NPV [28, 29].

Для оценки степени влияния факторов на изменение величины NPV используют коэффициент эластичности. Он показывает, на сколько процентов будет изменяться оцениваемый параметр при преобразовании одного из исследуемых показателей [28, 30, 31]

$$\varepsilon = \frac{100}{n-1}\sum_{1}^{n-1}\frac{\Delta y_i x_i}{\Delta x_i y_i},$$

где n – число точек; y_i – значение функции в i-й точке; Δy_i – приращение функции в i-й точке; x_i – значение аргумента в i-й точке; Δx_i – приращение аргумента в i-й точке.

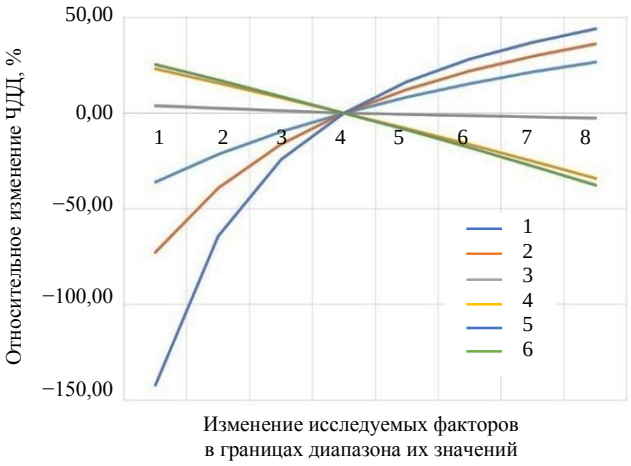


Рис.3. Влияние горно-технических параметров карьера на относительное изменение ЧДД

1 – высота уступа; 2 – длина блока; 3 – ширина площадки; 4 – угол откоса рабочего борта; 5 – глубина этапа; 6 – продолжительность этапа

Таким образом, при анализе полученных результатов можно выделить ряд значимых технических и экономических факторов, оказывающих наибольшее влияние на расчетную величину NPV.

На рис.3, 4 представлены графики зависимости горно-технических параметров карьера и экономических показателей отработки на относительное изменение ЧДД.

По степени влияния горно-технических параметров карьера на величину чистого дисконтированного дохода разделяются на две группы. Значения, оказывающие существенное влияние, относятся к группе значений высокой важности (продолжительность этапа, высота уступа, угол откоса рабочего борта, длина блока, глубина этапа), остальные значения попадают в группу низкой важности (ширина рабочей площадки) [20, 28].

По степени влияния экономических параметров карьера на величину чистого дисконтированного дохода можно выделить три группы значений, оказывающих влияние на важность исследуемого параметра: высокой важности – цена на руду, дисконтирующий фактор в период отработки этапа; средней важности – себестоимость добычи, дисконтирующий фактор в период строительства, величина инвестиций в период строительства; низкой важности.

На рис.5 представлен график, отражающий результаты определения коэффициента эластичности для горно-технических и экономических параметров и показателей месторождения. Значения, превышающие 100 %, говорят о том, что при изменении параметра в принятом диапазоне величина NPV изменяется более чем в два раза.

Экономические показатели (прибыль, капитальные затраты), а также продолжительность этапов разработки находятся в функциональной связи с эксплуатационным коэффициентом вскрыши и глубиной этапа. Предположим, что все указанные факторы, оказывающие влияние на рациональную глубину этапа разработки, остаются неизменными на уровне приведенных в таблице (средних значений), за исключением одного – исследуемого фактора. В этом случае каждому

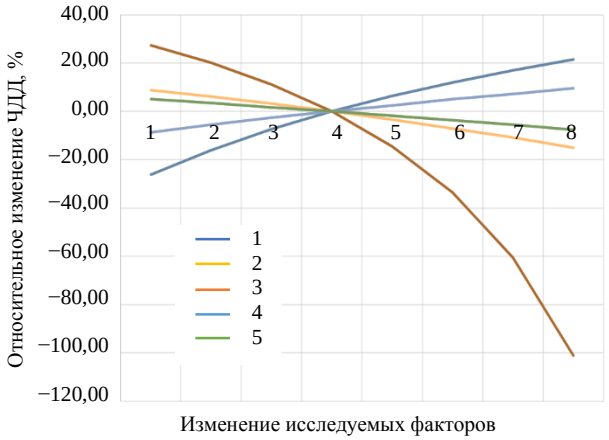


Рис.4. Влияние экономических параметров карьера на относительное изменение ЧДД

1 – цена на руду; 2 – себестоимость добычи руды; 3 – дисконтирующий фактор в период отработки первого этапа; 4 – дисконтирующий фактор в период строительства; 5 – величина инвестиций в период строительства

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

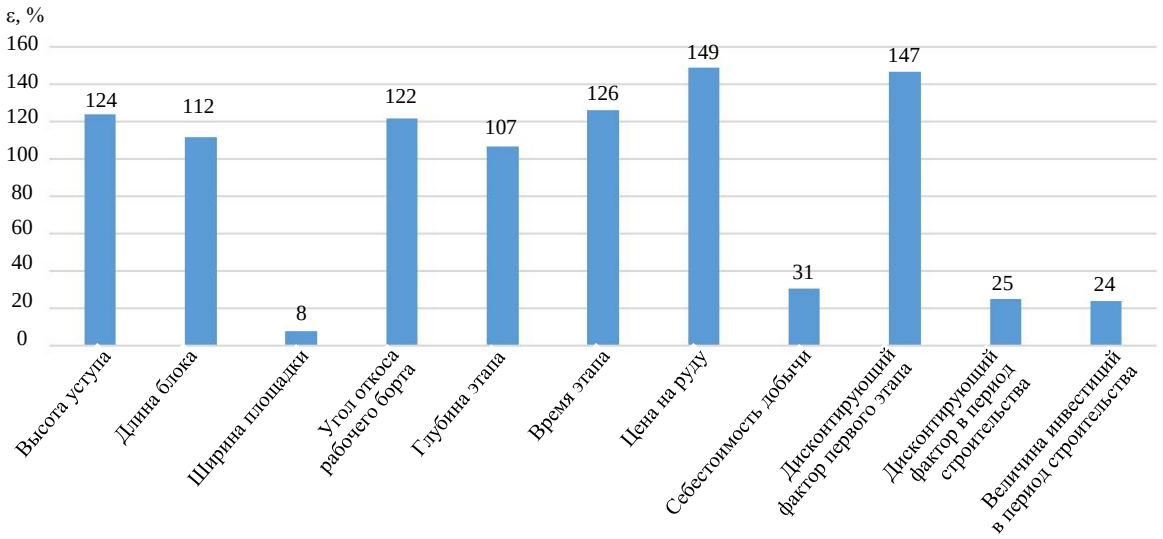


Рис.5. Коэффициенты эластичности для различных технико-экономических параметров и показателей

значению исследуемого фактора соответствует определенное значение рациональной глубины этапа. При изменении фактора получаем соответствующее изменение рациональной глубины этапа. На рациональную глубину этапа разработки существенное влияние оказывают факторы, связанные с текущими объемами горных работ и временными параметрами. Для рассматриваемых пределов определяющих факторов соотношение конечной глубины карьера и рациональной глубины этапа разработки располагаются в диапазоне 44-67 % и имеет среднее значение около 55 %.

Заключение

На главные параметры карьера при проектировании отработки этапами существенным образом влияют принятые параметры этапа, которые значительно воздействуют на экономическую эффективность отработки в целом. Сравнительную оценку инвестиционных проектов принято проводить по критерию максимума NPV. Используя предложенную методику, можно проанализировать степень влияния параметров и показателей этапа отработки на изменение чистого дисконтированного дохода и определить оптимальные значения для каждого параметра этапа.

В результате анализа влияния различных факторов на величину NPV можно сделать следующие выводы:

• На величину общего дисконтированного дохода существенное влияние оказывает ряд экономических и горно-технических факторов в период отработки первого этапа.

• При принятых средних значениях рассмотренные факторы по степени значимости их влияния на величину ЧДД располагаются в порядке уменьшения следующим образом: дисконтирующий фактор в период отработки первого этапа, цена на руду, дисконтирующий фактор первого этапа, продолжительность этапа отработки, высота уступа, угол откоса рабочего борта, длина рабочего блока, глубина этапа, себестоимость добычи на руду, дисконтирующий фактор в период строительства, величина инвестиций в период строительства, ширина рабочей площадки.

Установлено, что для принятия эффективных проектных решений на первом этапе отработки карьерных запасов необходима их технико-экономическая оценка по критерию ЧДД с учетом степени влияния горно-технических факторов, определенной с использованием предлагаемой методики и выраженной коэффициентом эластичности.

Экономические показатели (прибыль, капитальные затраты), а также продолжительность этапов разработки находятся в функциональной связи с эксплуатационным коэффициентом вскрыши и глубиной этапа.

Результаты анализа влияния различных факторов на рациональную глубину первого этапа разработки позволяют сделать следующие выводы:

• На рациональную глубину этапа разработки существенное влияние оказывают факторы, связанные с текущими объемами горных работ и временными параметрами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Для рассматриваемых пределов определяющих факторов соотношение конечной глубины карьера и рациональной глубины этапа разработки располагается в диапазоне 0,44-0,67, среднее значение – 0,55.

• Для принятых средних значений исходных данных в зависимости от коэффициента эластичности факторы, влияющие на рациональную глубину этапа, распределяются от самого значимого к наименее значимому: конечная глубина карьера, угол откоса ВНБ, процентная ставка, скорость понижения горных работ при разносе ВНБ, себестоимость вскрыши, удельные капиталовложения.

• Сравнительная экономическая оценка вариантов разработки месторождения не зависит от того, к какому моменту приводятся затраты, но этот момент должен быть одинаковым для всех сравниваемых вариантов. Все затраты следует приводить к начальному моменту времени начала эксплуатации месторождения. Таким образом, все время эксплуатации делится на два периода: период строительства карьера и период непосредственного функционирования. Финансовые затраты на строительство карьера рассматриваются как прошедшие затраты, а эксплуатационные затраты – как затраты будущих периодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ракишев Б.Р., Молдабаев С.К.* Очередность отработки сближенных крутопадающих залежей на примере Ломоносовского месторождения железных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 9. С. 284-295.

2. *Яковлев В.Л., Саканцев Г.Г., Яковлев А.В., Переход Т.М.* Регулирование режима горных работ глубоких карьеров большой протяженности с применением комбинированных временно нерабочих бортов // Проблемы недропользования. 2020. № 1 (24). С. 18-25. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.01.018

3. *Косолапов А.И., Пташник А.И., Пташник Ю.П.* Исследование возможности вариацией производственной мощностью рудных карьеров при разработке крутопадающих месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 9. С. 55-61.

4. *Косолапов А.И., Пташник А.И.* Исследование потенциальных возможностей интенсификации производственной мощности карьеров при этапной разработке крутопадающих месторождений в современных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 6. С. 50-66.

5. *Холодняков Д.Г., Логинов Е.В.* Управление режимом горных работ и углом откоса рабочего борта карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 71-74.

6. *Бехер В.Г.* Методические основы обоснования параметров этапов открытых горных работ в условиях колебания цен на рынке угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № S8. С. 3-10.

7. *Ракишев Б.Р.* Классификация технологических комплексов открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S1. С. 297-306.

8. *Ракишев Б.Р., Молдабаев С.К.* Обоснование порядка формирования рабочих зон на глубоких карьерах при экскаваторно-автомобильных комплексах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 1. С. 27-34.

9. *Аленичев В.М., Сытенков В.Н., Корнилков С.В., Яковлев В.Л.* Стратегия управления открытыми горными работами // Горный журнал. 2020. № 3. С. 34-39. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.06

10. *Беляков Н.Н.* Моделирование открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 12. С. 45-51.

11. *Федотов Г.С., Пастихин Д.В.* Влияние положения трассы вскрывающих выработок на объем горной массы в конечном контуре карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 6. С. 115-123. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-115-123

12. *Немова Н.А., Бельш Т.А.* Оценка вариантов отработки прибортовых и подкарьерных запасов рудника «Олений ручей» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 2. С. 45-51. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2480

13. *Титова А.В., Голик В.И.* К диверсификации рудодобывающего комплекса как направления развития экономической системы депрессивного типа // Горная промышленность. 2020. № 6. С. 112-117. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-112-117

14. *Толобекова Б.Т.* Особенности принципов управления современными горными проектами // Проблемы науки. 2018. № 5 (29). С. 117-119.

15. *Холодняков Г.А., Абдулаев М.Д.* Зависимость производительности карьера по руде от высоты уступа // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 84-86.

16. *Vedrova D.A., Reshetnyak S.P.* Methods to improve the waste rock dumping efficiency and reclamation under the north condition // 5th International Conference «Arctic: History and Modernity», 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia. 2020. Vol. 539. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012037

17. *Зайцев А.Ю.* Методический подход к обоснованию капитальных вложений золоторудных месторождений на основе удельных затрат // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 459-464. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.459

18. *Катышева Е.Г.* Отраслевые особенности формирования собственных финансовых ресурсов на предприятиях горной промышленности // Новый взгляд. Международный научный вестник. 2014. № 4. С.172-185.

19. *Черских О.И.* Методика выбора технико-технологических решений для реализации рационального режима горных работ на угольном разрезе с мощными пологопадающими пластами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S1-1. С. 275-290.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

20. *Соколов И.В., Смирнов А.А., Никитин И.В.* Методика экономической оценки долгосрочных стратегических решений при комбинированной разработке рудных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 3. С. 314-325. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-308-319

21. *Sinha S.K., Choudhary B.S.* Pit Optimization for Improved NPV and Life of Mine in Heterogeneous Iron Ore Deposit // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2020. Vol. 101. P. 253-264. DOI: 10.1007/s40033-020-00236-z

22. *Пешкова М.Х., Шульгина О.В.* Современные методы оценки инвестиционной привлекательности компаний минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S1. С. 193-208.

23. *Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Meshkov A.A., Sidorenko S.A.* Reproduction of the longwall panels: Modern requirements for the technology and organization of the development operations at coal mines // Eurasian Mining. 2020. Vol. 2. P. 19-23. DOI: 10.17580/em.2020.02.05

24. *Фомин С.И., Пасынков Д.В., Семенов А.С.* Определение эффективности инвестиций при реализации проектов рудных карьеров // Записки Горного института. 2009. Т. 180. С. 12-14.

25. *Gilani S.-O., Sattarvand J., Hajihassani M., Abdullah S.S.* A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty // Resources Policy. 2020. Vol. 68. № 101738. P. 8-12. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101738

26. *Ligotsky D.N., Mironova K.V.* Perspective technology of open-pit mining of limestone and dolomite // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. Iss. 7. P. 1613-1616. DOI: 10.36478/jeasci.2018.1613.1616

27. *Fathollahzadeh K., Ali Asad M.W., Mardaneh E., Cigla M.* Review of Solution Methodologies for Open Pit Mine Production Scheduling Problem // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2021. Vol. 35. Iss. 8. P. 564-599. DOI: 10.1080/17480930.2021.1888395

28. *Фомин С.И., Базарова Е.И.* Анализ чувствительности параметров рудных карьеров на предварительной стадии проектирования // Записки Горного института. 2015. Т. 216. С. 76-81.

29. *Loginov E., Ligotsky D., Argimbaev K.* Averaging the operating stripping ratio for sinking mining systems based on mathematical simulation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1614. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012050

30. *Галиев Ж.К., Галиева Н.В.* Эффективность функционирования крупных угледобывающих предприятий // Уголь. 2019. № 6 (1119). С. 59-63. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-6-59-63

31. *Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S.* Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals // Eurasian Mining. 2019. Vol. 1. P. 8-12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02

***Авторы*: Сергей Игоревич Фомин,** *д-р техн. наук, профессор* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-0939-1189*, **Максим Павлович Овсянников,** *аспирант* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *ovsyannikovmp@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0267-5469*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0