

Исследования функции экономической эффективности для оптимизации параметров развития горнодобывающего предприятия

Каплан Алексей Владимирович

доктор экономических наук, профессор, ЮУрГУ (НИУ), kaplan@mail.ru

В статье рассматривается методологический подход к оптимизации параметров развития горнодобывающего предприятия на основе анализа непрерывной функции экономической эффективности с учётом её динамики во времени. Авторы отмечают недостатки традиционных статических методов оценки эффективных запасов, таких как расчёт граничного коэффициента вскрыши, которые не учитывают изменение экономических показателей в процессе эксплуатации месторождения. Предложена экономико-математическая модель, основанная на функции чистого дисконтированного дохода (ЧДД), в которую интегрированы ключевые факторы: горно-геологические условия, удельные операционные и инвестиционные затраты, стоимость финансовых ресурсов и ликвидационные расходы. С использованием методов дифференциального и интегрального исчисления проведена оптимизация объёма извлекаемых запасов, производственной мощности и срока отработки месторождения. На примере участка месторождения в Кузбассе показано, что оптимальный объём добычи по критерию ЧДД составляет около 50 % разведанных запасов, тогда как по критерию IRR — лишь 37,5 %. Исследование выявило наибольшую чувствительность результатов к горногеологическим условиям (до 25 % на 1 % изменения фактора). Работа имеет практическую ценность для обоснования инвестиционных решений на всех этапах жизненного цикла горнодобывающего предприятия.

Ключевые слова: горнодобывающее предприятие, запасы минерального сырья, исследование функции, модель развития, оптимизация параметров, факторы воздействия, экономическая эффективность, экономическое развитие.

Введение

В современной научной литературе понятие «развитие» раскрывается прежде всего как процесс закономерного и целенаправленного изменения объекта с возникновением у него новых качеств и состояний (переход от простого к более сложному, от низшего к высшему). Развитие промышленного предприятия представляет собой процесс его качественных изменений, направленный на повышение надежности и эффективности его функционирования, в результате которого возникает ранее не существовавший набор элементов и их взаимосвязей [1, 2]. Развитие происходит непрерывно, но не линейно, включая периоды роста и спада, положительные и отрицательные с точки зрения экономики явления и тенденции, а также соответствующие количественные и качественные изменения параметров самой системы.

Развитие предприятия характеризуется наличием следующих основных признаков: качественный характер изменений, их необратимость и направленность. Следует отметить, что развитие хозяйствующего субъекта определяется не только изменением технико-технологических параметров, но и достижением определенного уровня экономической эффективности в условиях системы объективных природных, рыночных и законодательных ограничений [3].

Горнодобывающее предприятие — это специализированная организация, занимающаяся добычей полезных ископаемых из недр земли. Оно имеет ряд уникальных особенностей, которые отличают его от других видов промышленных предприятий:

- специфика сырьевой базы (исчерпаемость ресурсов, а также неоднородность заложения и качества минерального сырья);
- территориальная привязанность (локализация в удаленных районах, зависимость от невозможность перенесена в другое место);
- высокая капиталоемкость (значительные начальные инвестиции и длительный срок окупаемости);
- воздействие на окружающую среду (экологические риски и обязательства по рекультивации после завершения добычи).

Исходя из особенностей, выбор направлений развития горнодобывающего предприятия принимаются на основе ряда последовательно разрабатываемых документов, подтверждающих экономическую целесообразность и хозяйственную необходимость объекта. Подготовка месторождения полезных ископаемых к освоению — сложный, длительный и капиталоемкий процесс. Поэтому заказчик должен быть уверен не только в том, что проект создания горнодобывающего предприятия будет согласован и получит разрешение на строительство, но и в его экономической целесообразности, способности генерировать устойчивую прибыль. Именно для этого проводится предпроектная проработка — комплексный профессиональный анализ технических, экономических и организационных условий будущего строительства и эксплуатации объекта. [4, 5]. Состав предпроектных работ законодательно не регламентируется, однако как правило включает несколько стандартных этапов (табл.1).

Таблица 1

Этапы обоснования параметров проекта строительства и реконструкции горнодобывающего предприятия

Наименование этапа	Цель этапа	Уровень отклонений в оценке
Технико-экономический доклад (ТЭД, или Scoping Study)	Концептуальная оценка целесообразности и осуществимости проекта,	30-50%
Технико-экономический расчет (ТЭР, или PreFeasibility study)	Оценка жизнеспособности проекта, потенциальный уровень эффективности инвестиций, критических ограничений и целесообразности дальнейших исследований	20-25%
Технико-экономическое обоснование (ТЭО или Feasibility Study)	Определение технических, экологических и экономических условий для принятия решения об инвестициях	15-20%

Проектная документация (Design basic)	Обоснование технических решений, параметров и реализуемости проекта в соответствии с нормативными документами.	10-15%
Рабочая документация (Design detailed)	Комплект текстовых и графических документов, необходимых для производства строительных и монтажных работ.	5-10%

На этапе ТЭД и ТЭР В практике, при выполнении ТЭР, как правило, применяют методы приведенных затрат на основе данных о фактической работе предприятий-аналогов. Наименее формализуемым этапом обоснования параметров проекта строительства и реконструкции горнодобывающего предприятия является ТЭО, где с учетом оценки уровня и взаимосвязи воздействующих факторов прорабатываются варианты решений общих принципиальных вопросов: определение границ отработки и промышленных запасов; мощности и срока службы предприятия; способы вскрытия и подготовки месторождения и т.д. При достаточном уровне исследования факторов воздействия, взаимосвязей и ограничений на этапе ТЭО, последующее проектирование носит преимущественно технический характер.

Ключевым фактором развития горнодобывающего предприятия являются объём и качество извлекаемых запасов минерального сырья, которые определяют потенциальный уровень экономической эффективности и задают границы рациональных производственно-экономических параметров разработки месторождения. Традиционные методы оценки эффективных запасов, основанные на расчёте граничного коэффициента вскрыши, носят преимущественно статический характер: они не учитывают динамику экономических показателей в процессе отработки месторождения, а также не позволяют адекватно оценить уровни коммерческой и бюджетной эффективности проекта.

Теоретические основы

Категория эффективности развития промышленного предприятия является сложной и многомерной: она охватывает не только экономические, но и экологические, социальные, а также институциональные аспекты. Вследствие этой многоплановости, охватить все её компоненты единым критерием невозможно. Однако в рамках определённых ограничений и допущений — с учётом социально-экономических, экологических, технико-технологических и рыночных факторов — оценку экономической эффективности можно формализовать в виде единой целевой функции.

Рассмотрим горнодобывающее предприятие как экономическую систему, целевая функция которой направлена на максимизацию чистого эффекта, определяемого как разность между доходами от реализации добытого полезного ископаемого и совокупными затратами на его производство [9]:

$$\Pi_{\Sigma} = \int_0^Q \frac{\partial U}{\partial Q} dQ - \int_0^Q \frac{\partial S}{\partial Q} dQ \rightarrow \max, \text{руб.} \quad (1)$$

где Q – объём добычи полезного ископаемого, т; $\frac{\partial U}{\partial Q}$ и $\frac{\partial S}{\partial Q}$ – соответственно доход от реализации и удельные затраты на добычу полезного ископаемого, руб./т.

Следует отметить, что доходы и затраты не являются постоянными во времени величинами и зависят прежде всего от объемов производства и реализации, которые в свою очередь являются динамическими:

$$\begin{cases} \partial U = f(Q) \\ \partial S = f(Q) \\ Q = f(t) \end{cases} \quad (2)$$

где t – время.

Для обеспечения наиболее полного извлечения из недр запасов полезных ископаемых на этапе предпроектных работ рассматриваются варианты, когда по мере отработки наиболее благоприятных запасов минерального сырья можно последовательно подключать к отработке дополнительные участки недр, имеющие худшие горнотехнические условия, а соответственно и более высокий уровень затрат на добычу. На практике обычно рассматриваются три варианта, на основе которых осуществляется выбор: эффективный, умеренный и консервативный.

Расширение производства целесообразно лишь до тех пор, пока дополнительные затраты не сравняются с дополнительным валовым экономическим эффектом [22]:

$$\frac{\partial U - \partial S}{\partial Q} = 0, \text{руб./т} \quad (3)$$

Удельные затраты на добычу минерального сырья открытым способом с учетом объема вскрышных работ могут быть рассчитаны по формуле В.С. Хохрякова [10]:

$$s = \frac{\partial S}{\partial Q} = s_d + K_v s_v, \text{руб./т} \quad (4)$$

где s_d – затраты на добычу 1 т непосредственно полезного ископаемого (без учета вскрышных работ), руб./т; K_v – коэффициент вскрышных работ (средний объем, приходящийся на добычу 1 т полезного ископаемого), м³/т; s_v – затраты на буровзрывные работы, выемку, транспортирование и отвалообразования вскрышных пород, руб./м³.

Сделаем допущение, что до начала эксплуатации определен конечный контур карьера, а отработка месторождения ведется с постоянным уровнем производственной мощности (Q_t) и объема вскрышных работ ($Q_t K_v$). Такое допущение не может быть реализовано на практике в полной мере с учетом рационального графика режимов горных работ по горнотехническим, экономическим и рыночным факторам [11, 12]. Однако принятое усреднение параметров на период полной отработки участка недр не приводит к отклонениям погрешности расчетов, свыше допустимой на этапе ТЭО (15-20%).

Тогда в условиях стабильной экономической ситуации (неизменность удельных затрат и цены продукции) выручка от реализации продукции за каждый интервал эксплуатации месторождения пропорциональна объему добычи:

$$U_t = p Q_t, \text{руб.} \quad (5)$$

где p – средняя цена единицы произведенной продукции.

Тогда доход от операционной деятельности в каждом периоде эксплуатации месторождения минерального сырья составит:

$$\Phi_t = U_t - S_t = Q_t (p - s_d - K_v s_v), \text{руб.} \quad (6)$$

Отметим, что при принятых допущениях уровень доходов от операционной деятельности горнодобывающего предприятия, по сути, определяется планируемыми к извлечению запасами, с учетом горнотехнических условий месторождения полезных ископаемых.

Формирование и поддержание операционной деятельности предприятия невозможно без осуществления инвестиций – долгосрочного вложения ресурсов, с целью получения выгоды в будущем [13]. В зарубежной практике для определения инвестиционных вложений проектов отработки месторождений полезных ископаемых широко используются эмпирические формулы Т.У.Кэма, полученные на основе регрессионного анализа статистических данных о проектировании, строительстве и фактической работе различных горнодобывающих предприятий [14, 15, 16]. Для оценки масштабов предприятия и уровня инвестиционных вложений вместо параметра «производственная мощность по добыче» обычно используется показатель «производственная мощность по горной массе»:

$$M_t = Q_t \left(\frac{1}{\rho} + K_v \right), \text{м}^3/\text{год}, \quad (7)$$

где ρ – плотность добываемого минерального сырья, т/м³.

В общем случае величина инвестиционных затрат для горнодобывающего предприятия имеет некоторый положительный минимальный уровень, а с ростом производственной мощности увеличивается нелинейно. Тогда инвестиционные затраты могут быть оценены на основе следующего выражения:

$$IN = IN^0 + in_M M_t^b, \text{руб.}, \quad (8)$$

где IN^0 – инвестиционные затраты, связанные преимуществом с формированием производственной и социальной инфраструктуры, необходимой для организации производственного процесса, руб.; in_M – удельные инвестиционные затраты, обеспечивающие развитие и прирост производственной мощности предприятия, руб.-год/м³; b – коэффициент, определяющий возможность экономии инвестиционных ресурсов за счет эффекта масштаба, $b \in [0,5; 1,0]$.

С точки зрения совокупной экономической эффективности горнодобывающего предприятия за период полного жизненного цикла, важнейшее значение могут иметь и затраты, связанные с его последующей ликвидацией [15]. Такие затраты для горнодобывающего предприятия зачастую оказываются достаточно значимыми, и обычно осуществляются после завершения добычи эффективных запасов минерального сырья отработываемого месторождения. С другой стороны, от прекращения проекта в ряде случаев получают дополнительный доход (например, от реализации выбывающего имущества). Поэтому целесообразно рассмотреть ситуацию, когда завершение эксплуатации горнодобывающего предприятия обеспечивает некоторый (положительный или отрицательный) чистый ликвидационный доход L (ликвидационное сальдо). В об-

шем случае ликвидационное сальдо определяется прежде всего производственной мощностью предприятия по горной массе и может быть оценено аналогично тому, как оцениваются инвестиционные затраты:

$$L = L^0 + l_M M_t^p, \text{ руб. (9)}$$

где L^0 – ликвидационный доход, связанный преимуществом с производственной и социальной инфраструктурой предприятия, руб.; l_M – удельный ликвидационный доход, руб.-год/м³.

Удельный ликвидационный доход определяется как возможностью реализации высвобождаемых активов предприятия, так и затратами, связанными с исполнением обязательств по рекультивации после завершения добычи. В целом уровень ликвидационного дохода горнодобывающего предприятия коррелирует с его производственной мощностью.

Жизненный цикл горнодобывающего предприятия может быть представлен в виде инвестиционного проекта, включающего этапы инвестирования, эксплуатации и ликвидации. Тогда оценка экономической эффективности развития может базироваться на принципах оценки эффективности инвестиций: определении потенциальной способности приращения стоимости вложенных ресурсов за счет регулярного экономического эффекта, получаемого в течении жизненного цикла предприятия. Оценка эффективности инвестиций производится по результатам моделирования денежных потоков во времени, а при использовании в качестве критерия чистого дисконтированного дохода целевая функция отработки месторождения может быть записана в виде:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{(\Phi_t - l_M - L_t)}{(1+E)^t} \rightarrow \max \quad (10)$$

где Φ_t – операционный эффект (чистый операционный доход) для t -ого отрезка времени; l_M и L_t – соответственно инвестиционные и ликвидационные затраты для t -ого отрезка времени; E – ставка дисконтирования (отражает стоимость финансовых ресурсов для рассматриваемого проекта); T – рассматриваемый срок жизни проекта (срок службы месторождения полезных ископаемых).

Частую горнодобывающие предприятия являются градообразующими, либо играют значимую роль в экономике региона. Государство устанавливает нормативные правила, которым обязано подчиняться предприятие, и заинтересовано в их исполнении; обеспечении социальной стабильности и бюджетной эффективности производства. Ключевым фактором бюджетной эффективности горнодобывающего предприятия является налоговая нагрузка. Горнодобывающее предприятие в России обязано уплачивать все налоги в соответствии с законодательством, а кроме того, ряд специфических налогов: плата за пользование природными ресурсами, а также за воспроизводство и охрану природных ресурсов. В целом налоговая нагрузка горнодобывающего предприятия в России составляет 32-35% к выручке от реализации и ее основные статьи пропорциональны объему добытого и реализованного минерального сырья [16]. Соответственно государство заинтересовано в наиболее полном и интенсивном извлечении из недр запасов полезных ископаемых, т.е. максимизации дисконтированного бюджетного эффекта:

$$\text{ДБЭ} = \sum_{t=0}^T \frac{q_t}{(1+E)^t} p k_{nn} \rightarrow \max \quad (11)$$

где k_{nn} – коэффициент налоговой нагрузки.

Таким образом, с точки зрения интересов государства объем извлекаемых запасов месторождения должен быть максимальным и дополнительной оптимизации не требует.

Введем допущение, что затраты горнодобывающего предприятия, не связанные с операционной деятельностью, делаются одновременно:

- инвестиционные (связанные с освоением месторождения) в момент $t=0$ (до начала эксплуатации месторождения);
- ликвидационные в момент $t = (T + 1)$ (после окончания эксплуатации месторождения).

Тогда операционный эффект, инвестиционные и ликвидационные затраты являются величинами, определяемыми горнотехническими параметрами месторождения, производственной мощностью и общими экономическими параметрами. Целевая функция отработки месторождения может быть записана в виде:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{\Phi}{(1+E)^t} - \left(l_M + \frac{L}{(1+E)^{(T+1)}} \right) \rightarrow \max \quad (12)$$

Отметим, что результат операционной деятельности, а также уровень инвестиционных и ликвидационных затрат определяются прежде всего производственной мощностью, которая в свою очередь зависит от объема планируемых к отработке запасов месторождения. Оптимизация параметров экономического развития горнодобывающего предприятия должна учитывать фактор времени, включая не только интенсивность, но и общую продолжительность отработки запасов сырья конкретного

месторождения. Планируемый срок отработки месторождения в целом увеличивается с ростом запасов минерального сырья, планируемых к отработке. Рациональный срок службы месторождения можно определить аналитически по эмпирической формуле Тейлора [17]:

$$T = 0,2 Q_{\Sigma}^{0,25}, \text{ лет. (13)}$$

где Q_{Σ} – балансовые (планируемых к отработке) запасы минерального сырья, т.

Соответственно оптимальная производственная мощность будущего предприятия определяется как частное от деления объема извлекаемых запасов минерального сырья на срок службы месторождения:

$$Q_t = \frac{Q_{\Sigma}}{T} = 5 Q_{\Sigma}^{0,75}, \text{ млн. т/год (14)}$$

Функционирование любых производственных предприятий подчиняется закону убывающей отдачи, который для горнодобывающих предприятий обусловлен, прежде всего, неравномерностью залегания полезного ископаемого в недрах [18, 19]. С учетом принципа экономической целесообразности наиболее рациональными для первоочередной добычи являются участки с наилучшими горно-геологическими условиями. Последовательное вовлечение в отработку дополнительных участков недр приводит к ухудшению условий добычи: опережающему росту объемов вскрышных работ, росту удельных затрат, а в некоторых случаях и снижению качества минерального сырья. При этом сама взаимосвязь между объемом вскрышных работ по отношению к объему планируемых к извлечению запасов минерального сырья может быть представлена степенной функцией, отражающей рост среднего коэффициента вскрыши с увеличением объема планируемых к вовлечению в отработку запасов месторождения:

$$K_v = N Q_{\Sigma}^R + K_0, \text{ м}^3/\text{т. (15)}$$

где N – коэффициент пропорциональности, отражающий изменение удельного объема вскрышных работ с приростом планируемых к отработке запасов месторождения, м³/т²; R – коэффициент, определяющий темпы прироста коэффициента вскрыши; K_0 – коэффициент вскрышных работ, обеспечивающий извлечение наиболее благоприятных запасов минерального сырья месторождения, м³/т.

Коэффициент пропорциональности N , отражающий изменение удельного веса вскрышных работ с приростом планируемых к отработке запасов, для большинства известных месторождений имеет положительное значение. Для горизонтальных и пологопадающих пластовых месторождений полезных ископаемых зависимость коэффициента вскрыши от объема извлекаемых запасов с высокой степенью точности может быть аппроксимирована линейной функцией ($R \approx 1,0$). Для большинства сложноструктурных месторождений с удовлетворительной точностью возможно использование степенной зависимости $R \in [0,5; 1,5]$.

Использование приведенных выше зависимостей позволяет учесть для горнодобывающего предприятия взаимосвязь производственной мощности по добыче и горной массе от объема вовлекаемых в отработку запасов месторождения. Соответственно именно объем вовлекаемых в отработку запасов становится ключевым фактором формирования денежных потоков и чистого дисконтированного дохода.

Представление денежных потоков в дискретной форме оформляется в виде таблиц, что существенно упрощает проведение расчетов и обеспечивает наглядность. В то же время такой расчет ограничивает возможности анализа существенных свойств и особенностей инвестиционного процесса. Поиск рациональных решений при дискретном подходе осуществляется на основе сравнения альтернативных вариантов, число которых для определения оптимальных параметров и соотношений значимых факторов может оказаться неограниченным.

Альтернативное представление денежных потоков как непрерывной и гладкой функции позволяет использовать инструментальный математического анализа для поиска области рациональных параметров проекта с учетом неопределенности внешних и внутренних факторов воздействия.

Методы математического анализа пока не получили широкого практического применения в оценке коммерческой эффективности проектов. Это может быть связано с особенностями классического подхода директ-костинга, при котором предприятие рассматривается как линейная система с постоянными и переменными затратами. Данный метод обеспечивает достаточную точность только для предприятий, производящих однородную продукцию с простой технологической цепочкой и минимальным количеством переделов исходного сырья. В более сложных производственных системах такой подход может давать существенные искажения в расчетах эффективности.

Для природной системы достоверная оптимизация ключевых параметров (объема извлекаемых запасов, периода отработки месторождения, производственной мощности и потенциального уровня доходов) не может быть выполнена как для линейной системы. В то же время полученные зависимости позволяют провести нелинейную оптимизацию с использованием методов математического анализа. Это осуществляется через исследование функции (12), преобразованной к непрерывному виду путем замены дискретного времени $t=1, 2, 3, \dots, n$ на непрерывное $\tau \geq 0$:

$$\text{ЧДД}(\tau) = \Phi \int_0^T \frac{d\tau}{(1+E)^\tau} - \left(IN + \frac{L}{(1+E)^{(T+1)}} \right) \quad (16)$$

Заметим, что:

$$\int_0^T \frac{d\tau}{(1+E)^\tau} = \frac{1-(1+E)^{-T}}{\ln(1+E)} \quad (17)$$

Поэтому:

$$\text{ЧДД}(\tau) = \Phi \frac{1-(1+E)^{-T}}{\ln(1+E)} - \left(IN + \frac{L}{(1+E)^{(T+1)}} \right) \quad (18)$$

При полной отработке месторождения $\tau = T$. Таким образом, мы можем использовать систему подстановок (формулы 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15), предопределяющих функцию зависимости уровня чистого дисконтированного дохода, генерируемого горнодобывающим предприятием, от планируемых для вовлечения в отработку запасов минерального сырья:

$$\begin{cases} \Phi_t = Q_t (p - s_d - K_v s_v) \\ IN = IN^0 + in_M Q_t \left(\frac{1}{\rho} + K_v \right)^b \\ L = L^0 + l_M Q_t \left(\frac{1}{\rho} + K_v \right)^b \end{cases} \quad \begin{cases} Q_t = 5Q_\Sigma^{0,75} \\ T = 0,2Q_\Sigma^{0,25} \\ K_v = NQ_\Sigma^R + K_0 \end{cases} \quad (19)$$

Полученная функция отражает зависимость чистого дисконтированного дохода от объема вовлекаемых в эксплуатацию запасов минерального сырья и позволяет моделировать параметры экономического развития горнодобывающего предприятия. Подход к исследованию непрерывной функции, в отличие от принципа разработки сценариев (характерного для традиционного дискретного подхода), обеспечивает оптимизацию параметров в условиях существенной неопределенности комбинаций ключевых факторов воздействия (уровень затрат; стоимость финансовых ресурсов; горно-геологические условия и т.д.).

Результаты исследования

Рассмотрим применение изложенных теоретических предпосылок для условий одного из участков месторождения полезных ископаемых, расположенного в Кузбассе. Проведенный горно-геометрический анализ позволил подтвердить, что взаимосвязь между коэффициентом вскрыши и объемом планируемых к извлечению запасов месторождения с достаточной достоверностью может быть представлена линейной функцией (рис.1).

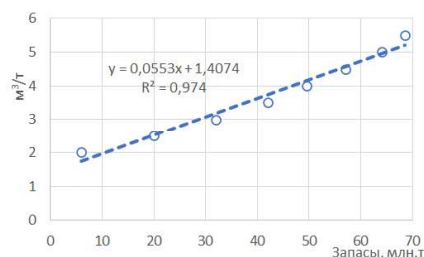


Рисунок 1. Функциональная зависимость минимально возможного коэффициента вскрыши от объема извлекаемых запасов

Отметим, что исходными данными для моделирования являются прогнозные значения экономических, горнотехнических и организационных факторов:

- цена продукции (p), а также удельная себестоимость выемки и транспортирования минерального сырья и вскрышных работ (s_d, s_v);
- стоимость денежных средств, применительно к рассматриваемому проекту (E);
- физические свойства минерального сырья и горнотехнические условия участка месторождения, предполагаемого к отработке (ρ, A, K_0, B);

- уровень инвестиционных и ликвидационных затрат (IN^0, L^0, in_M, l_M).

В зависимости от объема планируемых к извлечению запасов, могут быть определены: рациональный уровень производственной мощности по добыче; коэффициент вскрыши; производительность по горной массе (рис.2).

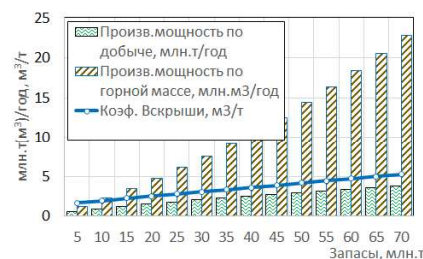


Рисунок 2. Взаимосвязь между объемом планируемых к извлечению запасов месторождения, производственной мощностью и коэффициентом вскрыши

Определение рациональных параметров отработки месторождения в свою очередь позволяет оценить уровни удельных затрат, операционного дохода и прибыльности (рис.3).



Рисунок 3. Взаимосвязь объема планируемых к извлечению запасов месторождения с доходами и затратами горнодобывающего предприятия

Найденные параметры не позволяют напрямую определить оптимальный уровень извлекаемых запасов, но предоставляют необходимую информацию для оценки инвестиционных и ликвидационных затрат. Это, в свою очередь, позволяет установить зависимость показателей коммерческой эффективности проекта от предполагаемого объема отработки запасов месторождения (рис.3).

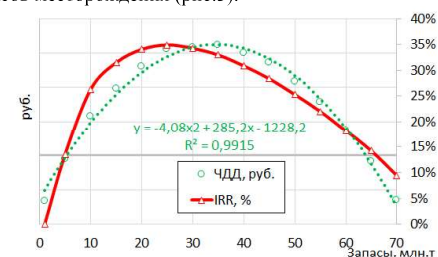


Рисунок 4. Взаимосвязь объема извлекаемых запасов месторождения с показателями экономической эффективности: чистым дисконтированным доходом (ЧДД) и внутренней нормой доходности (IRR)

Отметим, что найденная взаимосвязь имеет значимые отличия при оценке оптимальных для извлечения запасов с использованием различных критериев [20, 21, 23]:

- по критерию внутренней нормы доходности (IRR) - около 25 млн.т (37,5% от объема разведанных запасов месторождения);
- по критерию чистого дисконтированного дохода - около 35 млн.т (50,0% от объема разведанных запасов месторождения).

Очевидно, что для оптимизации объема извлекаемых запасов месторождения, большую перспективу имеет критерий чистого дисконтированного дохода: он ориентирован на более полную отработку запасов месторождения и соответственно в большей степени удовлетворяет интересы государства.

На основе исследования полученной непрерывной функции чистого дисконтированного дохода (18) для рассматриваемого месторождения установлено, что рост уровня операционных и инвестиционных затрат, коэффициента вскрыши и ставки дисконтирования существенно снижает оптимальное значение вовлекаемых в обработку запасов и потенциальный уровень чистого дисконтированного дохода (кривая АВ, рис.5).

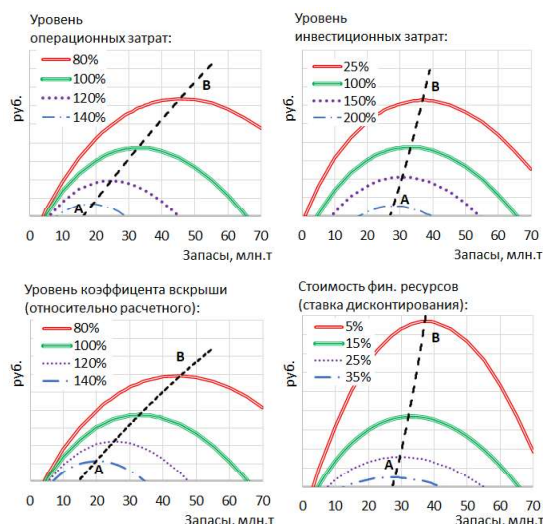


Рисунок 5. Исследование функции эффективности

Проведенное исследование устойчивости достигаемых экономических результатов показало, что наибольшее влияние на рациональный уровень отработки запасов месторождения оказывают следующие факторы (табл.2):

- горногеологические условия – до 25% на 1 % изменения фактора;
- операционные затраты – до 15% на 1 % изменения фактора;
- стоимость финансовых ресурсов – до 14% на 1 % изменения стоимости;
- инвестиционные затраты – до 10% на 1 % изменения фактора.

Таблица 2

Эластичность экономических показателей по ключевым факторам развития горнодобывающего предприятия (процентное изменение результата на 1% изменения фактора)

Фактор	Влияние на уровень достигаемого NPV	Влияние на оптим. уровень запасов
Инвестиционные затраты	0,9±1,1%	1,0±10,0%
Стоимость финансовых ресурсов	1,7±3,3%	1,0±14,0%
Операционные затраты	2,0±4,0%	1,0±15,0%
Горногеологические условия	4,0±20,0%	5,0±25,0%

Исследование непрерывной функции экономической эффективности позволяет оценить и оптимизировать такие параметры развития горнодобывающего предприятия как производственная мощность, срок отработки и рентабельность для условий варируемости факторов внешней и внутренней среды; оценить экономическую устойчивость проекта в различных условиях.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы оптимизации параметров развития горнодобывающего предприятия на основе анализа функции экономической эффективности. Исследование проводилось с использованием методов экономико-математического моделирования для оценки влияния внешних и внутренних факторов на рациональность параметров отработки запасов месторождений полезных ископаемых.

На примере одного из участков недр месторождения в Кузбассе было показано, что оптимальный объем извлекаемых запасов существенно отличается в зависимости от выбранного критерия оценки коммерческой эффективности и составляет от объема разведанных запасов:

- по критерию внутренней нормы доходности — 37,5%;
- по критерию чистого дисконтированного дохода — около 50,0%.

Задача оптимизации параметров горнодобывающего предприятия может быть решена на основе определения рационального объема извлекаемых запасов минерального сырья, что, в свою очередь, позволяет обосновать оптимальную производственную мощность и срок эксплуатации месторождения, обеспечивающие максимизацию чистого дисконтированного дохода (ЧДД).

Исследование полученной непрерывной функции позволило оценить устойчивость достигаемых экономических результатов и выявить наиболее значимые факторы, влияющие на оптимальный уровень отработки запасов (в % на 1% изменения фактора): горногеологические условия – до 25%; операционные затраты – до 15%; стоимость финансовых ресурсов – до 14%; инвестиционные затраты – до 10%.

Предложенный подход позволяет оптимизировать параметры развития горнодобывающего предприятия, включая производственную мощность, срок отработки и рентабельность, с учетом варируемости внешних и внутренних факторов. Это особенно актуально для принятия решений на этапах предпроектной проработки и планирования инвестиций.

Таким образом, проведенное исследование вносит существенный вклад в развитие теоретических и практических подходов к оптимизации параметров развития горнодобывающих предприятий, формируя методологическую основу для принятия обоснованных инвестиционных решений. Его результаты могут быть успешно применены при разработке технико-экономических обоснований, стратегическом планировании горных проектов, а также при оценке их инвестиционной привлекательности на различных этапах жизненного цикла.

Литература

1. Баев, И.А. Эффективность промышленного производства на Южном Урале. / И.А. Баев // Научные школы ЮУрГУ. История развития / под ред. А.Л.Шестакова. – Челябинск, 2008. – С. 399–406.
2. Рудычев, А.А. Стратегическое развитие промышленного предприятия: теория, методология, практика: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. –192 с.
3. Погонец С. В., Бочарова И. Ю. Теоретические основы эффективности развития промышленного предприятия// Вестник ВГТУ. 2012. №10-1. – Сс. 74-81.
4. Капутин Ю.Е. Информационные технологии и экономическая оценка горных проектов (для горных инженеров). СПб.: Недра, 2008. – 397 с.
5. Еньшин, Н. В. Сравнение российского и международного подходов к проектированию / Н. В. Еньшин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 7. – С. 354-357.
6. Гузев А. Г. Проектирование и строительство горных предприятий: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 232 с.
7. Конкурентоспособность предприятий горнопромышленного комплекса: Монография / А. С. Соколов, А. В. Душин, В. Е. Стровский, В. В. Балашенко. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 103 с.
8. Каплан А.В. Управление социально-экономическим развитием горнодобывающего предприятия. М.: Экономика, 2015. – 270 с.
9. Петраков Н. Я. Русская рулетка: Экономический эксперимент ценою 150 миллионов жизней. М.: Экономика, 1998. – 286 с.
10. Экономико-математическое моделирование и проектирование карьеров / В.С. Хохряков, Г.Г. Саканцев, А.З. Яшкин и др. – М.: Наука, 1977. – 199 с.
11. Арсентьев А.И. Производительность карьеров / СПб: Петербургский горный ин-т., 2002 – 85 с.
12. Методика управления параметрами горнотехнической системы в динамике развития горных работ для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия в изменяющихся условиях рынка / С. Е. Гавришев, В. Ю. Заляднов, А. И. Курочкин [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 4. – С. 5-14. – DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-4-5-14.
13. Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика / П.Л.Виленский, В.Н.Лившиц, С.А.Смоляк; Акад. нар. хоз-ва при Правительстве РФ, Ин-т системного анализа РАН, Центральный экономико-мат. ин-т РАН. - Москва: Дело, 2008. - 1103 с.
14. Camm T.W. Simplified Cost Models for Prefeasibility Mineral Evaluation // Bureau of Mines information Circular. 1991

15. Camm, Thomas W. and Stebbins, Scott A., «Simplified cost models for underground mine evaluation. A Handbook for Quick Prefeasibility Cost Estimates – Revised Edition» (2023). Mining Engineering. 16. https://digitalcommons.mtech.edu/mine_engr/16

16. Экономические основы разведки и разработки месторождений. Твердые полезные ископаемые [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. Г. Попов; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2022. – 112 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Popov-Ekonomicheskie-osnovy-razvedki-i-razrabotki-mestorozhdenij-Tverdye-poleznye-iskopaemye.pdf>.

17. Логвиненко, О. А. Экосистемные услуги как составляющая национального богатства России / О. А. Логвиненко, М. Н. Игнатъева, А. В. Душин. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 185 с.

18. Юмаев, М. М. Направления развития системы налогообложения добычи твердых полезных ископаемых: специальность 08.00.10 «Финансы, денежное обращение и кредит»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора экономических наук / Юмаев Михаил Мияссырович. – Москва, 2012. – 45 с.

19. Taylor, H. K. (1978). Mine valuation and feasibility studies. In J. Hoskins & W. Green (Eds.), *Mineral Industry Costs* (2nd ed., pp. 1-17). Northwest Mining Association.

20. Сысоев А.А. Оценка граничного коэффициента вскрыши на стадии предпроектных исследований // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2004. №4 (41). С. 46-48.

21. Каплан, А.В. Совершенствование управления развитием угледобывающего предприятия: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Алексей Владимирович Каплан; ЮУрГУ – Челябинск., 2000. – 129 с.

22. Вальрас Л. Неизвестный экономист: Герман Генрих Госсен. // Истоки: 150 лет маржиналистской революции. М.: Издательский дом НИУ ВШЭ, 2023. – С. 35-65.

23. Liu, M. Research on investment project evaluation: Comparative analysis based on NPV and IRR / M. Liu // *Highlights in Business, Economics and Management*. – 2024. – Vol. 24. – P. 1133-1138. – DOI 10.54097/k1xfx426

Research of the economic efficiency function for optimization of development parameters of a mining enterprise

Kaplan A.V.

SUSU (NRU)

JEL classification: B00, D20, E22, E44, L23, L51, L52, M11, M20, M30, Z33

This article examines a methodological approach to optimizing mining enterprise development parameters based on an analysis of a continuous economic efficiency function, taking into account its dynamics over time. The authors note the shortcomings of traditional static methods for estimating effective reserves, such as calculating the marginal stripping ratio, which do not account for changes in economic indicators during deposit operation. An economic and mathematical model based on the net present value (NPV) function is proposed, integrating key factors: mining and geological conditions, specific operating and investment costs, the cost of financial resources, and liquidation expenses. Using differential and integral calculus methods, optimization of the volume of recoverable reserves, production capacity, and deposit life is conducted. Using a Kuzbass deposit as an example, it is shown that the optimal production volume according to the NPV criterion is approximately 50% of proven reserves, while according to the IRR criterion, it is only 37.5%. The study revealed the highest sensitivity of the results to mining and geological conditions (up to 25% per 1% change in the factor). The work has practical value for substantiating investment decisions at all stages of the mining enterprise life cycle.

Keywords: mining enterprise, mineral reserves, function study, development model, parameter optimization, influencing factors, economic efficiency, economic development.

References

1. Baev, I.A. Industrial Production Efficiency in the Southern Urals. / I.A. Baev // *SUSU Scientific Schools. History of Development* / edited by A.L. Shestakov. – Chelyabinsk, 2008. – Pp. 399–406.
2. Rudychev, A.A. Strategic Development of an Industrial Enterprise: Theory, Methodology, Practice: Monograph. Belgorod: BSTU Publishing House, 2006. –192 p.
3. Pogonev S.V., Bocharova I.Yu. Theoretical Foundations of Industrial Enterprise Development Efficiency// *VSTU Bulletin*. 2012. No. 10-1. – Pp. 74–81.
4. Kaputin Yu.E. Information Technologies and Economic Evaluation of Mining Projects (for Mining Engineers). St. Petersburg: Nedra, 2008. – 397 p.
5. Enshin, N. V. Comparison of Russian and International Approaches to Design / N. V. Enshin // *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. – 2012. – No. 7. – pp. 354-357.
6. Guzeev, A. G. Design and Construction of Mining Enterprises: Textbook for Universities. 3rd ed., revised and enlarged. – Moscow: Nedra, 1987. – 232 p.
7. Competitiveness of Mining Enterprises: Monograph / A. S. Sokolov, A. V. Dushin, V. E. Strovsky, V. V. Balashenko. – Moscow: IPR Media, 2023. – 103 p.
8. Kaplan A.V. Management of Socioeconomic Development of a Mining Enterprise. Moscow: *Economica*, 2015. – 270 p.
9. Petrakov N. Ya. Russian Roulette: An Economic Experiment Worth 150 Million Lives. Moscow: *Economica*, 1998. – 286 p.
10. Economic and Mathematical Modeling and Design of Quarries / V.S. Khokhryakov, G.G. Sakantsev, A.Z. Yashkin, et al. – Moscow: Nauka, 1977. – 199 p.
11. Arsenyev A.I. Quarry Productivity / St. Petersburg: Petersburg Mining Institute, 2002 – 85 p.
12. Methodology for managing the parameters of the mining engineering system in the dynamics of mining operations development to ensure sustainable functioning of the mining enterprise under changing market conditions / S. E. Gavrishev, V. Yu. Zalyadnov, A. I. Kurochkin [et al.] // *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov*. – 2024. - Vol. 22, No. 4. - Pp. 5-14. - DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-4-5-14.
13. Evaluation of the effectiveness of investment projects: theory and practice / P. L. Vilensky, V. N. Livshits, S. A. Smolyak; Academician of National Economy under the Government of the Russian Federation, Institute of Systems Analysis of the Russian Academy of Sciences, Central Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences. – Moscow: Delo, 2008. – 1103 p.
14. Camm T.W. Simplified Cost Models for Prefeasibility Mineral Evaluation // *Bureau of Mines information Circular*. 1991
15. Camm, Thomas W. and Stebbins, Scott A., “Simplified cost models for underground mine evaluation. A Handbook for Quick Prefeasibility Cost Estimates – Revised Edition” (2023). Mining Engineering. 16. https://digitalcommons.mtech.edu/mine_engr/16
16. Economic foundations of exploration and development of deposits. Solid minerals [Electronic resource]: study guide / A. G. Popov; Perm State National Research University. - Electronic data. - Perm, 2022. - 112 p. - Access mode: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Popov-Ekonomicheskie-osnovy-razvedki-i-razrabotki-mestorozhdenij-Tverdye-poleznye-iskopaemye.pdf>.
17. Logvinenko, O. A. Ecosystem services as a component of Russia's national wealth / O. A. Logvinenko, M. N. Ignatyeva, A. V. Dushin. – Moscow: IP R Media, 2023. – 185 p.
18. Yumaev, M. M. Directions for the development of the taxation system for the extraction of solid minerals: specialty 08.00.10 "Finance, money circulation and credit": abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Economics / Yumaev Mikhail Miasyrovich. – Moscow, 2012. – 45 p.
19. Taylor, H. K. (1978). Mine valuation and feasibility studies. In J. Hoskins & W. Green (Eds.), *Mineral Industry Costs* (2nd ed., pp. 1-17). Northwest Mining Association.
20. Sysoev, A. A. Evaluation of the boundary stripping coefficient at the pre-project research stage // *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2004. No. 4 (41). P. 46-48.
21. Kaplan, A. V. Improving the management of a coal mining enterprise: dis. ... Cand. of Economics: 08.00.05 / Alexey Vladimirovich Kaplan; SUSU - Chelyabinsk., 2000. - 129 p.
22. Walras, L. “The Unknown Economist: Hermann Heinrich Gossen.” // *Origins: 150 Years of the Marginalist Revolution*. Moscow: HSE Publishing House, 2023. – Pp. 35–65.
23. Liu, M. “Research on Investment Project Evaluation: Comparative Analysis Based on NPV and IRR” // *Highlights in Business, Economics and Management*. – 2024. – Vol. 24. – Pp. 1133–1138. – DOI 10.54097/k1xfx426