pISSN 2073-039X
eISSN 2311-8725

Математические методы и модели

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РУДНИКА НА ПРИБЫЛЬ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ПРИМЕРЕ «ПРЕДПРИЯТИЯ ЭРДЭНЭТ»*

Иван Михайлович ПОТРАВНЫЙ[a,•], Даваахуу НЯМДОРЖ[b], Ирина Владимировна СУХОРУКОВА[c], Геннадий Геннадьевич ЛИХАЧЕВ[d]

[a] доктор экономических наук, профессор кафедры управления проектами и программами,
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Российская Федерация
ecoaudit@bk.ru

[b] аспирантка кафедры управления проектами и программами,
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Российская Федерация
dabuk91@mail.ru

[c] доктор экономических наук, профессор кафедры высшей математики,
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Российская Федерация
suhorukovaira@yandex.ru

[d] кандидат физико-математических наук, ведущий эксперт НЦИТ «ИНТЕРТЕХ», Москва, Российская Федерация
lihachev69@yandex.ru

[•] Ответственный автор

История статьи:
Получена 03.07.2017
Получена в доработанном виде 04.08.2017
Одобрена 10.08.2017
Доступна онлайн 28.09.2017

УДК 3304.2:338.622
JEL: O21, O32, Q56

Ключевые слова: истощение природных ресурсов, модель, экологический ущерб, горнодобывающее предприятие

Аннотация

Предмет. Рассматриваются вопросы использования забалансовой руды и отходов обогащения в качестве ресурсной базы горнодобывающего предприятия в условиях истощения запасов руды в месторождении. Такой подход позволяет продлить срок действия предприятия в условиях закрытия рудника, снизить себестоимость продукции за счет переработки ресурсов техногенного месторождения, ликвидировать накопленные отходы. Горнодобывающее предприятие «Эрдэнэт» в Монголии ориентировано на добычу и переработку медно-молибденовой руды. К числу основных эколого-экономических проблем предприятия относятся исчерпание недр, ущерб от загрязнения окружающей среды, рост затрат на добычу и переработку сырья, низкие мировые цены на медь, образование большого количества отходов. Предлагается экономико-математическая модель управления природопользованием, которая учитывает степень вовлечения и переработки вскрышных пород, отходов обогащения и другие эколого-экономические параметры и их влияние на прибыль предприятия.

Цели. Методическое обоснование и разработка экономико-математической модели функционирования горнодобывающего предприятия, учитывающей влияние экологических факторов и производственных характеристик рудника на прибыль предприятия. Проводится оценка влияния изменения технических характеристик производственных подразделений на прибыль горнодобывающего предприятия.

Методология. Используется модель оптимизации управления природопользованием с применением компьютерного моделирования. Построена экономико-математическая модель влияния экологических и производственных характеристик рудника на прибыль, использованы методы статистического и регрессионного анализа.

Результаты. Установлено, что на изменение прибыли сильное влияние оказывают изменение значений коэффициента вскрыши и коэффициента обогатимости, а также добыча горной массы и капиталовложений.

Выводы. Увеличение прибыли может быть получено с увеличением коэффициента вскрыши на руднике открытых работ и коэффициента обогатимости на обогатительной фабрике, то есть на основе переработки накопленной забалансовой руды, что связано с уменьшением добычи первичного сырья и капиталовложений.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2017

Для цитирования: Потравный И.М., Даваахуу Нямдорж, Сухорукова И.В., Лихачев Г.Г. Экономико-математическая модель влияния экологических и производственных характеристик рудника на прибыль горнодобывающего предприятия на примере «Предприятия Эрдэнэт» // Экономический анализ: теория и практика. – 2017. – Т. 16, № 9. – С. 1759 – 1777.
https://doi.org/10.24891/ea.16.9.1759

Введение

Как отмечалось в докладе на заседании Государственного совета с повесткой дня «Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений» (27 декабря 2016 г.)[1], проблемы истощения природных ресурсов, накопления отходов и связанные с ними загрязнение атмосферного воздуха, воды и почвы относятся к числу основных глобальных экологических проблем современности. По оценкам, почти 10% всех используемых в мире ресурсов становятся отходами.

Проблемы истощения и исчерпания природных ресурсов в экономике тесно связаны с ликвидацией объектов накопленного экологического ущерба, с возможностью замещения первичного природного сырья вторичными ресурсами на основе переработки отходов производства и потребления[2] [1]. Это предполагает разработку модели хозяйственного развития на принципах «зеленой» экономики, что связано с вовлечением отходов и ресурсов техногенных месторождений в экономический оборот, оздоровление окружающей среды, экономию природных ресурсов и ликвидацию накопленных загрязнений [2–4].

По данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации в 2015 году», в настоящее время реализуется программа «Ликвидация накопленного экологического ущерба» в рамках государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 годы, в которую включены проекты по переработке отходов, связанных с прошлой экономической деятельностью[3]. Отметим, что в 2015 г. объем образовавшихся отходов всех классов опасности на единицу валового внутреннего продукта составил 83,38 т на 1 млн руб. ВВП. При этом численность населения, проживающего на территориях с неблагополучной экологической ситуацией, подверженной негативному воздействию, связанному с прошлой хозяйственной деятельностью, составила 17,57 млн чел.[4]. В этих условиях ликвидация накопленного экологического ущерба с учетом сохранения природного капитала, экономии первичных природных ресурсов за счет переработки и использования отходов выделена в настоящее время в качестве приоритетного направления в документах стратегического планирования [5–7].

В настоящее время сложилась определенная система методов управления природопользованием применительно к деятельности горнодобывающих предприятий [8–10]. Значительный интерес при этом представляет экономическое регулирование в данной сфере в связи с необходимостью учета фактора ограниченности природных ресурсов, комплексной оценки эколого-экономической эффективности производства, оценки накопленного экологического ущерба и выгод от использования ресурсов техногенных месторождений [11–13]. Такой подход соответствует оценке природно-ресурсного потенциала с позиций регионального природопользования в интересах устойчивого развития территории [14, 15].

Горнодобывающее предприятие «Эрдэнэт», которое было запущено в эксплуатацию в 1978 г., представляет собой крупнейший в Монголии производственный комплекс, ориентированный на добычу и переработку медно-молибденовой руды месторождения «Эрдэнэтийн-Овоо». Предприятие внесло существенный вклад в развитие экономики

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Проекты № 15-02-00141а и № 15-22-03003а(м).

[1] Заседание Государственного совета по вопросу об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений. URL: http://www.kremlin.ru/events/president/news/53602

[2] *Эндрес А., Квернер И.* Экономика природных ресурсов. Рынки, технологии и инновации. М.: Питер, 2004. 256 с.

[3] Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году». М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2016. С. 489.

[4] Там же. С. 506.

страны. Вместе с тем за время функционирования этого предприятия было получено не только большое количество полезной продукции (медного и молибденового концентрата), но и образовались значительные объемы забалансовой руды, отходов обогащения, которые оказывают негативное воздействие на состояние окружающей среды и здоровье населения. Следует учитывать, что данные накопленные отходы в условиях исчерпания имеющихся сырьевых ресурсов на предприятии в последующие 35 лет можно рассматривать как своего рода техногенные месторождения, что может продлить срок деятельности предприятия.

В настоящее время можно выделить следующие основные эколого-экономические проблемы: исчерпание на данном месторождении ресурсов и снижение содержания полезного компонента в добываемой руде, ущерб от загрязнения окружающей среды, рост затрат на добычу и переработку сырья, низкие мировые цены на готовую продукцию (медь), образование большого количества отходов (вскрышных пород) и др. В качестве одной из мер по обеспечению предприятия сырьем в условиях исчерпания данного месторождения рассматривается вовлечение забалансовой руды и отходов обогащения для основного производства, а также для развития других отраслей экономики (промышленности строительных материалов, дорожного строительства и др.) [16].

Материалы и методы исследования

Для анализа поставленной проблемы, а также поиска оптимальных путей ее решения предлагается использовать экономическую модель оптимизации управления предприятием с применением компьютерного моделирования, успешное применение которой было рассмотрено в более ранних работах[5] [17]. Одной из основных задач при этом является поиск эффективного механизма снижения затрат и увеличения прибыли предприятия.

Поскольку ресурсы на данном месторождении исчерпываются, предлагается рассмотреть основные экономические и экологические параметры, характеризующие деятельность производственных подразделений предприятия. В качестве таких характеристик можно принять коэффициент вскрыши рудника открытых работ и коэффициент обогатимости обогатительной фабрики, добычу горной массы, себестоимость медного концентрата и величину капиталовложений на развитие горно-обогатительных сооружений, а также добычу руды, содержание меди в руде и цену меди на мировом рынке.

Коэффициент вскрыши – показатель, используемый при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, он представляет собой отношение количества пустых пород к количеству полезного ископаемого. Данный коэффициент может быть вычислен по следующей формуле:

$$K = V_{в} / V_{и}, \quad (1)$$

где K – коэффициент вскрыши, доли ед.;

$V_{в}$ – объем вскрышных (пустых, относительно бедных по содержанию полезного компонента) пород, м^3;

$V_{и}$ – объем полезного ископаемого в добываемом сырье, м^3.

В свою очередь коэффициент обогатимости представляет собой способность полезных ископаемых к разделению на соответствующие продукты при их обогащении, которая зависит от контрастности разделительных признаков полезного ископаемого, а также от минерального состава, текстуры и структуры полезных ископаемых, и является технологической оценкой

[5] *Лихачев Г.Г., Сухорукова И.В.* Компьютерное моделирование и математическое обеспечение экономико-социальных задач // Экономический анализ: теория и практика. 2003. № 5. С. 60–62; *Сухорукова И.В., Лихачев Г.Г.* Экономическая модель оптимизации при централизованном управлении закупками дочерних компаний государственной корпорации // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 6. С. 115–123.

возможной полноты выделения полезных компонентов из руд путем их обогащения. Коэффициент обогатимости является обязательной характеристикой месторождений полезных ископаемых при оценке запасов и разработке технологических схем.

Анализ показывает, что в условиях исчерпания запасов месторождения и закрытия в перспективе рудника стратегическими направлениями деятельности горнодобывающего предприятия «Эрдэнэт» являются:

- переход к производству конечных продукций с более высокой степенью переработки сырья с использованием руды и отходов обогащения, развитие инновационных процессов в сфере ресурсосбережения;
- повышение технического уровня основных производственных фондов в части использования ресурсов техногенного месторождения для поддержания объемов выпускаемой продукции;
- соединение инновационного и инвестиционного процессов модернизации и обновления основных фондов предприятия для получения прибыли при минимизации затрат на производство продукции.

Стратегической целью является определение оптимальной мощности предприятия с выходом на максимальные показатели технико-экономической и экологической эффективности с учетом изменившихся макроэкономических условий, учитывая истощение минеральной базы.

Такой подход включает в себя следующие организационно-экономические аспекты:

- расширение рудно-сырьевой базы предприятия;
- увеличение производственной мощности;
- получение товарной продукции с низкой себестоимостью;
- повышение полноты извлечения полезных компонентов;
- модернизация и реконструкция производства.

Инвестиционные затраты для обеспечения вывода предприятия на заданный уровень производства продукции были определены с учетом существующей рудной базы, перерабатывающих мощностей.

Основными направлениями инвестиционных затрат являются:

- замена изношенного оборудования;
- обновление оборудования обогатительной фабрики;
- внедрение комплекса циклично-поточной технологии в карьере.

При этом основными источниками финансирования инвестиционных затрат являются чистая прибыль и накопленные амортизационные отчисления. Это позволит с учетом вовлечения в хозяйственный оборот забалансовой руды и отходов обогащения снизить себестоимость товарной продукции.

Следует отметить, что участие предприятия в разработке и реализации ресурсосберегающих мероприятий, переработке и утилизации отходов можно рассматривать как одну из форм экологической и социальной ответственности бизнеса [18, 19].

Приоритетной задачей при построении модели являлось изучение возможности получения дополнительной прибыли по сравнению с исходным состоянием производства при вовлечении в оборот забалансовой руды и отходов обогащения. Расчеты базировались на данных работы предприятия за 2005–2015 гг. и перспективных показателях развития на период до 2020 г. При этом показатели эффективности инвестиционных затрат на развитие производства на перспективу

направлены на снижение издержек производства за счет увеличения его объема в условиях модернизации предприятия.

Основная деятельность горнодобывающего комбината направлена на получение и реализацию запланированного объема медного, молибденового концентратов. Основными производственными подразделениями (цехами) предприятия являются рудник открытых работ, обогатительная фабрика, автотранспортное предприятие, а также ремонтно-механический завод. Поэтому в ходе исследования была выполнена также оценка влияния изменения технических характеристик производственных подразделений на прибыль предприятия.

Рассмотрим зависимость чистой прибыли горнодобывающего предприятия «Эрдэнэт» от технических и экономических параметров, в частности, от коэффициента вскрыши на руднике открытых работ, коэффициента обогатимости на обогатительной фабрике, величины горной массы, капитальных вложений и себестоимости медного концентрата.

Результаты исследования

Данные для расчетов представлены в *табл. 1*. В последнем столбце приведены значения корреляции между величиной чистой прибыли и соответствующей величиной технического или экономического параметра предприятия. Анализируя эти величины, можно прийти к выводу, что высокая степень корреляции обнаруживается между чистой прибылью и коэффициентом обогатимости (0,92), величиной горной массы (0,92), коэффициентом вскрыши (0,83) и размером капиталовложений (0,7).

С остальными параметрами обнаруживается слабая степень корреляции. Например, между чистой прибылью и добычей руды (0,08), содержанием меди в руде (0,43), себестоимостью медного концентрата (–0,88) и мировой ценой меди (–0,64), а значит, эти параметры слабо влияют на чистую прибыль и их можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

Из анализа данных, представленных в *табл. 1*, следует, что чистая прибыль сильно зависит от коэффициента обогатимости, коэффициента вскрыши, горной массы, себестоимости медного концентрата и величины капиталовложений.

Динамика изменения коэффициента вскрыши рудника открытых работ и изменение коэффициента обогатимости обогатительной фабрики на предприятии за 2004–2015 гг. представлены на *рис. 1, 2*.

Коэффициент вскрыши на руднике открытых работ за рассматриваемый период стабилизировался и составляет 0,66, в то же время коэффициент обогатимости на обогатительной фабрике после некоторого снижения в 2010–2011 гг. имеет некоторую тенденцию к росту (*рис. 1*).

Капитальные вложения на поддержание развития горно-обогатительного производства за рассматриваемый период значительно сократились, что в значительной мере связано с исчерпанием месторождения по добыче исходного сырья (*рис. 3*).

В то же время объем добычи горной массы на предприятии остается стабильным и составляет порядка 18 млн м^3 (*рис. 4*).

Следует отметить, что в связи с исчерпанием и истощением запасов природного сырья, усложнением условий добычи руды, необходимостью переработки значительно большего количества горной массы для получения единицы готовой продукции в условиях уменьшения содержания полезного компонента в руде, значительно возросла себестоимость 1 т медного концентрата на данном предприятии (*рис. 5*).

Для оптимизации процессов природопользования в условиях закрытия в перспективе рудника предприятия обосновывается необходимость

использования в производстве ресурсов техногенных месторождений, то есть ранее накопленных отвалов забалансовой руды и отходов обогащения.

Построим математическую модель, описывающую влияние коэффициента вскрыши x_1, коэффициента обогатимости x_2, горной массы x_4 и величины капиталовложений x_3 на величину чистой прибыли Y.

Для этого применим методы линейного регрессионного анализа и используем многопараметрическую линейную регрессию:

$$Y = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + d \cdot x_3 + e \cdot x_4. \quad (2)$$

Линейный регрессионный анализ данной эколого-экономической проблемы заключается в подборе графика для набора наблюдений с помощью метода наименьших квадратов.

Регрессионный анализ позволяет установить функциональную зависимость между случайной величиной Y (в нашем случае это чистая прибыль) и влияющими на Y величинами X_i (это значения коэффициента вскрыши x_1, коэффициента обогатимости x_2, горной массы x_4 и величины капиталовложений x_3).

Для оценки степени связи между величинами используется коэффициент множественной корреляции R (корреляционное отношение) Пирсона, который может принимать значения от 0 до 1. Значение $R = 0$, если между величинами нет никакой связи, и $R = 1$, если между величинами имеется функциональная связь, величина R^2 – коэффициент детерминации.

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,995937
R-квадрат	0,99189
Нормированный R-квадрат	0,986484
Стандартная ошибка	3876,199
Наблюдения	11

Коэффициент детерминации R^2 вычисляется как отношение суммы квадратов регрессии SSR к полной сумме квадратов SST.

Полная сумма квадратов SST равна сумме квадратов разностей между наблюдаемыми фактическими значениями переменной Y и ее средним значением:

$$SST = \sum_{i=1}^{n} \left(Y_i - \bar{Y} \right)^2. \quad (3)$$

Сумма квадратов регрессии SSR равна сумме квадратов разностей между предсказанными теоретическими значениями переменной Y и ее средним значением:

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} \left(\hat{Y}_i - \bar{Y} \right)^2. \quad (4)$$

Множественный R – это корень из коэффициента детерминации R^2, другое название этого показателя – индекс корреляции, или множественный коэффициент корреляции. Нормированный R-квадрат вычисляется по следующей формуле:

$$\frac{(n-1)R^2 - k}{n-k-1}, \quad (5)$$

где n – количество значений переменной Y;

k – количество столбцов во входном интервале переменной X (в нашем случае $n = 11$, $k = 4$).

В столбце «Коэффициент» (*табл. 2*) приведены значения коэффициентов функции регрессии, при этом в строке Y-пересечение записаны значения свободного члена a.

Отсюда a = –914125, b = 534414,2, c = 11155,07, d = –0,70282, e = 5,270398, а $R^2 = 0,99$.

Значение коэффициента детерминации R^2 показывает на очень точное описание выбранной моделью фактических данных и на сильное влияние коэффициента

вскрыши, коэффициента обогатимости, горной массы и величины капиталовложений на чистую прибыль. Таким образом, 99% общей вариации результативного признака объясняется вариацией факторных признаков x_1, x_2, x_3, x_4. Значит, выбранные факторы существенно влияют на чистую прибыль, что подтверждает правильность их включения в построенную модель.

В столбце «*P*-значение» (*табл. 2*) приведены значения уровней значимости коэффициентов регрессии, соответствующие вычисленным значениям t_p (*t*-статистика). Очевидно, что все эти значения оказываются меньше, чем значение заданного уровня значимости 0,05:

$P_0 = 0{,}000274 < 0{,}05$;

$P_1 = 0{,}000344 < 0{,}05$;

$P_2 = 0{,}009019 < 0{,}05$;

$P_3 = 0{,}001948 < 0{,}05$;

$P_4 = 0{,}000159 < 0{,}05$.

Таким образом, эти коэффициенты являются значимыми. Кроме того, сравнивая попарно элементы массивов «Коэффициент» и «Стандартная ошибка», можно видеть, что коэффициенты переменных x_1, x_2, x_3, x_4 существенно больше своих стандартных ошибок.

Результаты дисперсионного анализа, которые используются для проверки адекватности построенной модели по критерию Фишера и для проверки значимости коэффициента детерминации R^2, представлены в *табл. 3*.

В столбце «*F*» приведено расчетное значение *F*-критерия Фишера $F_р$, а в столбце «Значимость *F*» – значение уровня значимости, соответствующее вычисленному значению $F_р$ (*табл. 3*). Рассчитанный уровень значимости (показатель в столбце «Значимость *F*») $\alpha_р = 2{,}12 \cdot 10^{-6} < \alpha = 0{,}05$ подтверждает значимость R^2.

Подход к проверке адекватности построенной модели по критерию Фишера основан на проверке попадания $F_р$ (показатель *F*) в критическую область ($F^{кр}_{пр,\alpha}$, $+\infty$). Принимая значение уровня значимости $\alpha = 0{,}05$ и учитывая, что число степеней свободы для строки «Регрессия» (*табл. 3*) определяется количеством факторных признаков в уравнении регрессии $k_ф = k = 4$, а число степеней свободы для строки «Остаток» определяется числом наблюдений *n* и количеством переменных $k + 1$ в уравнении регрессии $k_о = n - (k + 1) = 6$, получим, что в нашем случае $F^{кр}_{пр,\alpha}$ F (0,05; 4;6) = 4,5337. Так как $F_р$ = 183,4677 попадает в критический интервал (4,5337, $+\infty$), то гипотеза $R^2 = 0$ отвергается, то есть коэффициент детерминации R^2 является значимым, что подтверждает достаточно высокую адекватность построенного уравнения. Показатель средней ошибки аппроксимации, равный 4,7%, также подтверждает достаточно высокую адекватность построенного уравнения.

Проведем проверку факторов на мультиколлинеарность. Для этого составим матрицу взаимных корреляций (*рис. 6*).

Для оценки мультиколлинеарности факторов может использоваться определитель матрицы парных коэффициентов корреляции. Если бы факторы не коррелировали между собой, то матрица парных коэффициентов корреляции между факторами была бы единичной матрицей, а матрица коэффициентов корреляции между факторами имела бы определитель, равный единице. Если же, наоборот, между факторами существует полная линейная зависимость и все коэффициенты корреляции равны единице, то определитель такой матрицы равен нулю.

В нашем случае коэффициенты парной корреляции отличны от единицы, а определитель матрицы парных коэффициентов корреляции отличен от нуля и равен 0,031407827. Таким образом, можно сделать вывод, что

мультиколлинеарность факторов является слабой.

Тогда подставим значения коэффициентов в выражение (2) и получим

$Y = -914\,125 + 534\,414{,}2\,x_1 + 11\,155{,}07\,x_2 - 0{,}70282\,x_3 + 5{,}270398\,x_4$.

Эта формула показывает, что выбранная модель очень точно описывает зависимость чистой прибыли от коэффициента вскрыши и коэффициента обогатимости, горной массы, себестоимости медного концентрата и величины капиталовложений (*табл. 4*).

Формула (2) может быть использована для анализа, прогнозов и оценок потенциальной чистой прибыли.

Рассчитаем значения прогнозируемой максимальной теоретической чистой прибыли и прогнозируемой минимальной теоретической чистой прибыли, а также прогнозируемое среднее значение теоретической чистой прибыли (*табл. 5*).

Прогнозируемая максимальная теоретическая чистая прибыль – это значение чистой теоретической прибыли, рассчитанное по формуле (2) при максимальном значении всех рассмотренных параметров (x_1, x_2, x_3, x_4 принимают максимальное значение).

Прогнозируемая минимальная теоретическая чистая прибыль – это значение чистой теоретической прибыли, рассчитанное по формуле (2) при минимальном значении всех рассмотренных параметров (x_1, x_2, x_3, x_4 принимают минимальное значение).

Прогнозируемая средняя теоретическая чистая прибыль – это значение чистой теоретической прибыли, рассчитанное по формуле (2) при среднем значении всех рассмотренных параметров (x_1, x_2, x_3, x_4 принимают среднее значение).

На основе фактических и расчетных данных построим графики для прогнозируемой максимальной теоретической чистой прибыли и прогнозируемой минимальной теоретической чистой прибыли, а также прогнозируемое среднее значение теоретической чистой прибыли (*рис. 7*).

Как видно, на изменение теоретической (прогнозируемой) чистой прибыли сильное влияние оказывают изменение значений коэффициента вскрыши и коэффициента обогатимости, а также добыча горной массы и капиталовложений. Такой подход отражает перспективность стратегии горнодобывающего предприятия по использованию вскрышных пород и отходов обогащения для получения полезной продукции в условиях исчерпания месторождения и закрытия рудника горных работ.

Для оценки уровня вовлечения ресурсов техногенных месторождений в хозяйственный оборот, использования забалансовой руды и отходов обогащения на предприятии может быть использована процедура экологического аудита [20].

Выводы

Таким образом, увеличение прибыли может быть получено с ростом коэффициента вскрыши на руднике открытых работ, то есть с вовлечением в экономический оборот ресурсов техногенных месторождений и коэффициента обогатимости на обогатительной фабрике, а также горной массы и уменьшением капиталовложений.

Таблица 1

Оценка показателей развития горнодобывающего предприятия «Эрдэнэт» с применением циклично-поточной технологии добычи и транспортировки руды из карьера в 2004–2015 гг.

Table 1

Evaluation of performance indicators of Erdenet miner development using the conveyor ore transportation technology in 2004–2015

Показатель	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Чистая прибыль, тыс. долл.	–	143 360	84 410	48 656	39 658	38 906
Коэффициент вскрыши, $м^3/м^3$	0,68	0,73	0,75	0,69	0,67	0,67
Коэффициент обогатимости, т	48,9	49,1	47,7	46,6	47,1	47
Капитальные вложения на поддержание и развитие горно-обогатительного производства, тыс. долл.	44 500	45 566	45 008	39 723	38 930	13 643
Горная масса, млн $м^3$	18 410	28 650	18 550	18 780	19 430	15 400
Добыча руды, тыс. т	27 920	27 550	27 090	27 780	27 750	29 200
Содержание меди в руде, %	0,609	0,588	0,594	0,593	0,574	0,565
Себестоимость 1 т медного концентрата, долл.	268,35	292,54	610,28	978,24	1 226,7	772,67
Мировая цена 1 т меди, долл.	2 866	3 679	6 722	7 119	6 956	5 150

Продолжение таблицы

Показатель	2010	2011	2012	2013	2014	2015	*K*[*]
Чистая прибыль, тыс. долл.	40 815	37 052	36 429	36 178	35 414	35 573	–
Коэффициент вскрыши, $м^3/м^3$	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,83
Коэффициент обогатимости, т	47	45,9	46,1	46,1	46,3	46,3	0,92
Капитальные вложения на поддержание и развитие горно-обогатительного производства, тыс. долл.	9 971	3 458	6 994	11 086	6 037	4 131	0,7
Горная масса, млн $м^3$	16 370	17 150	16 500	16 500	16 500	16 500	0,92
Добыча руды, тыс. т	27 575	29 724	27 000	26 000	25 200	25 100	0,08
Содержание меди в руде, %	0,548	0,535	0,53	0,5	0,4	0,35	0,43
Себестоимость 1 т медного концентрата, долл.	1 280,3	1 140,3	1 284,6	1 290,1	1 295	1 310,1	–0,88
Мировая цена 1 т меди, долл.	7 535	8 425	8 500	7 400	6 390	5 495	–0,64

[*] Корреляция между величиной чистой прибыли и соответствующей величиной технического или экономического параметра предприятия.

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 2

Дисперсионный анализ

Table 2

Variance analysis

Показатель	Коэффициент	Стандартная ошибка	*t*-статистика	*P*-значение
Y-пересечение	–914125	120582,4	–7,58091	0,000274
Переменная X_1	534414,2	73476,21	7,273296	0,000344
Переменная X_2	11155,07	2939,291	3,795156	0,009019
Переменная X_3	–0,70282	0,134258	–5,23484	0,001948
Переменная X_4	5,270398	0,630294	8,361803	0,000159

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа для проверки адекватности построенной модели

Table 3

Variance analysis results to verify the built model's adequacy

Показатель	*df*	*SS*	*MS*	*F*	Значимость *F*
Регрессия	4	1,1E+10	2,76E+09	183,4677	2,12E-06
Остаток	6	90149523	15024920	–	–
Итого...	***10***	***1,11E+10***	**–**	**–**	**–**

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 4

Теоретическая и фактическая чистая прибыль горнодобывающего предприятия, тыс. долл. США

Table 4

Theoretical and actual net profit of the mining enterprise, thousand USD

Год	Потенциальная (теоретическая) чистая прибыль	Фактическая чистая прибыль
2005	142 684	143 360
2006	84 916	84 410
2007	45 507	48 656
2008	44 379	39 658
2009	39 796	38 906
2010	36 801	40 815
2011	38 563	37 052
2012	34 883	36 429
2013	32 007	36 178
2014	37 787	35 414
2015	39 126	35 573

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 5

Значения прогнозируемых максимальной, минимальной и средней теоретической чистой прибыли, тыс. долл. США

Table 5

Predicted maximum, minimum and average theoretical net profit, thousand USD

Показатель	Значение
Чистая прибыль максимальная	153 371,8
Чистая прибыль минимальная	23 995,72
Чистая прибыль средняя	53 080,15

Источник: авторская разработка

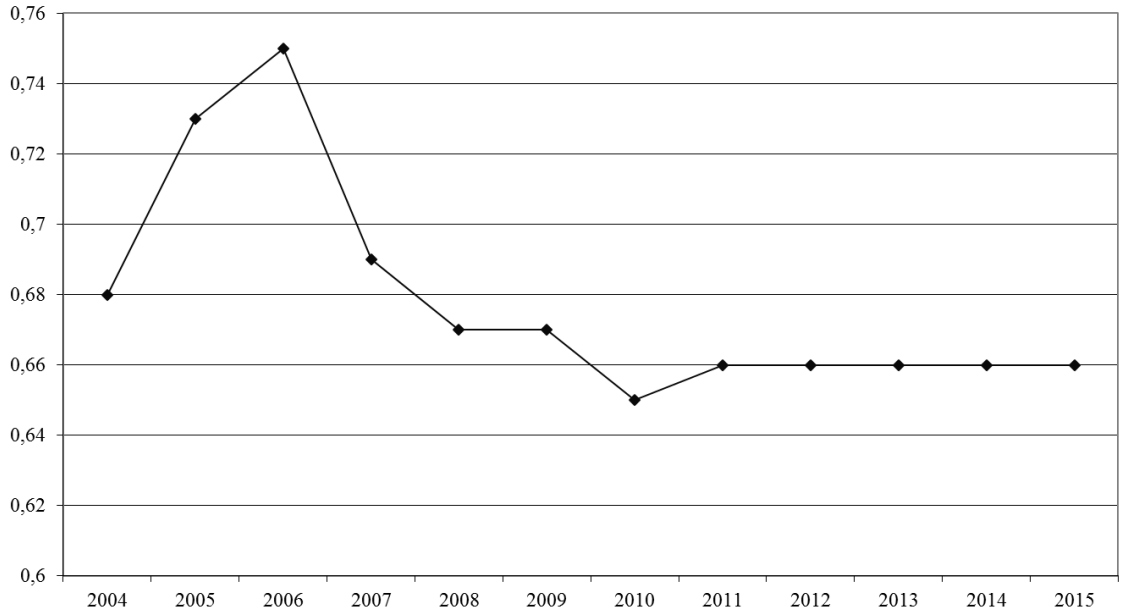
Source: Authoring

Рисунок 1

Коэффициент вскрыши рудника открытых работ в 2004–2015 гг., м³/м³

Figure 1

Stripping ratio of the open-pit mine in 2004–2015



Источник: авторская разработка

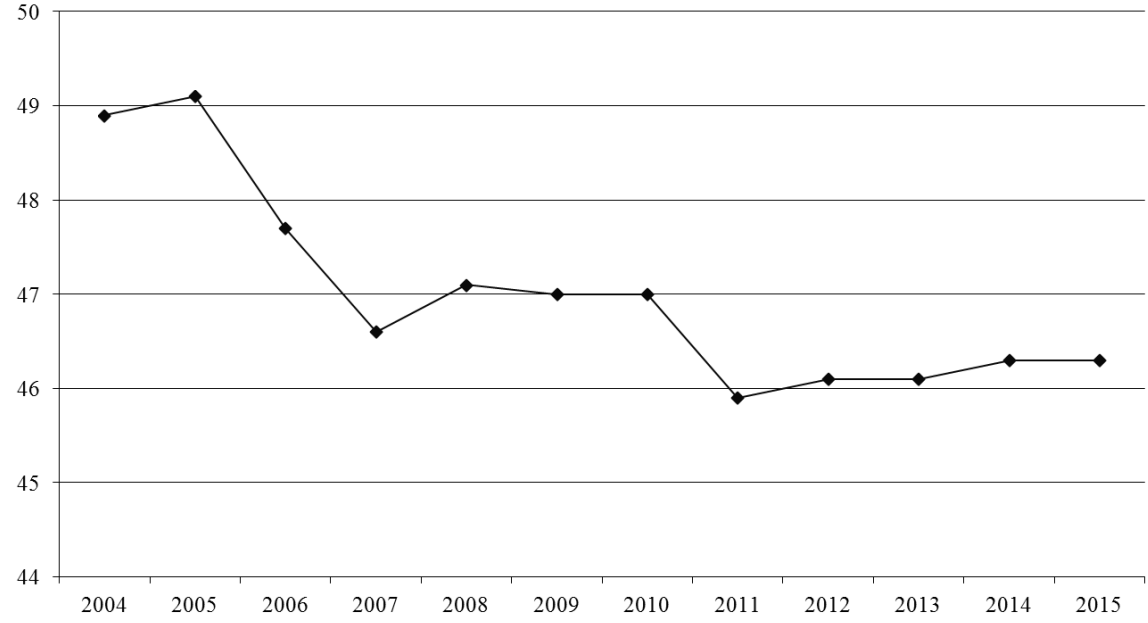
Source: Authoring

Рисунок 2

Коэффициент обогатимости обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия «Эрдэнэт» в 2004–2015 гг., т

Figure 2

Washability ratio at the concentrating mill of Erdenet in 2004–2015, tonne



Источник: авторская разработка

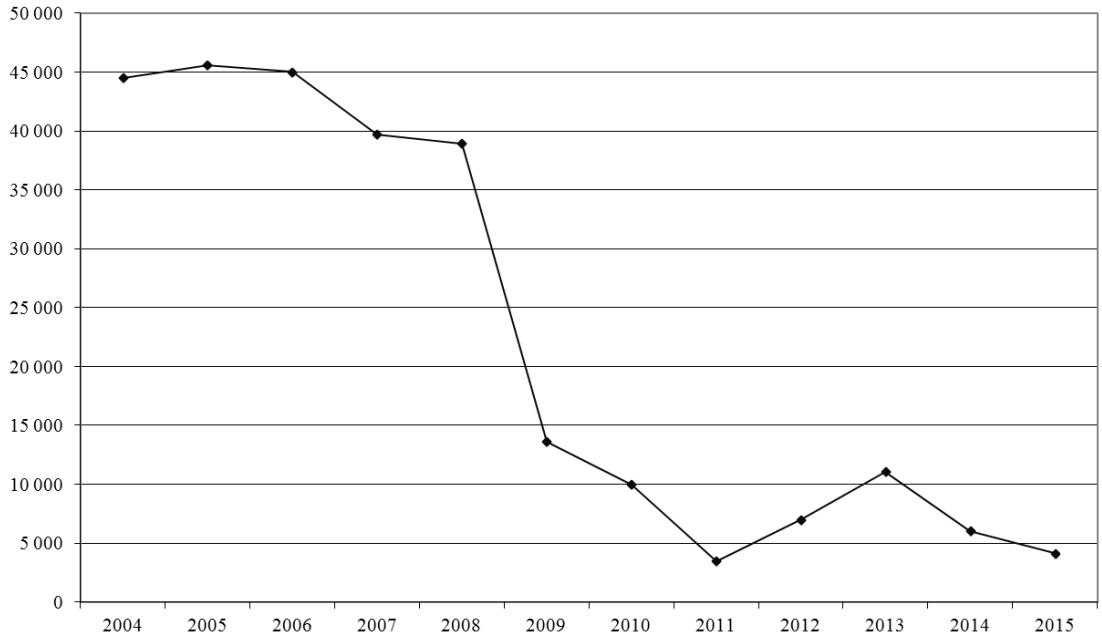
Source: Authoring

Рисунок 3

Капитальные вложения предприятия на поддержание и развитие горно-обогатительного производства в 2004–2015 гг., тыс. долл. США

Figure 3

Capital investment of the enterprise to maintain and develop mining and processing works in 2004–2015, thousand USD



Источник: авторская разработка

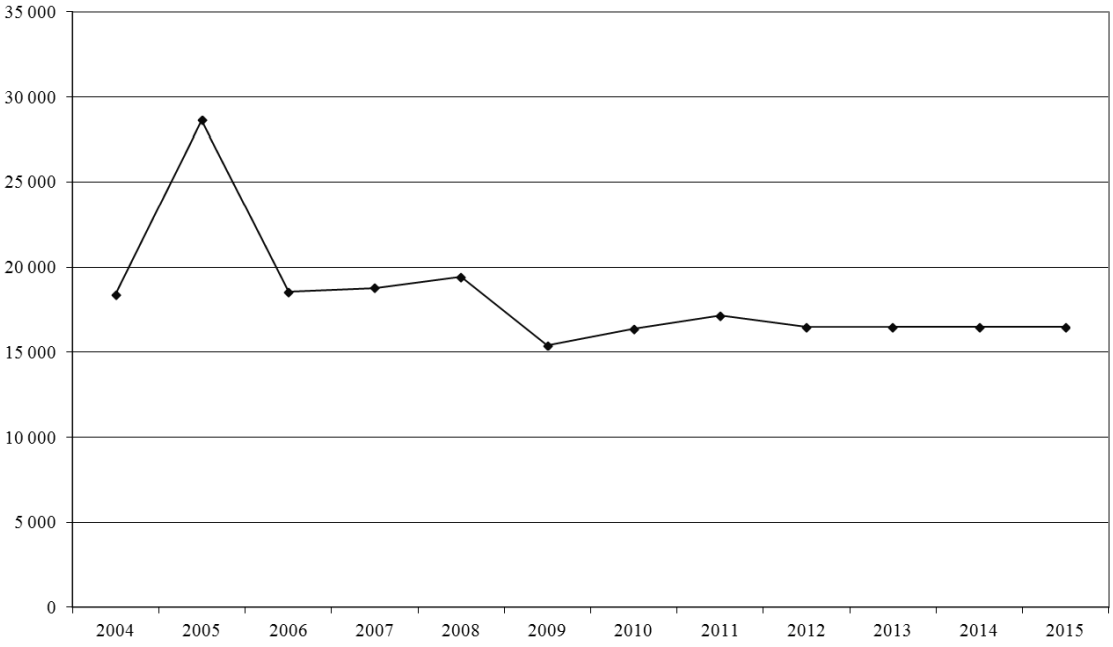
Source: Authoring

Рисунок 4

Добыча горной массы на предприятии «Эрдэнэт» в 2004–2015 гг., млн м^3

Figure 4

Mined rock output of Erdenet in 2004–2015, million cubic meter



Источник: авторская разработка

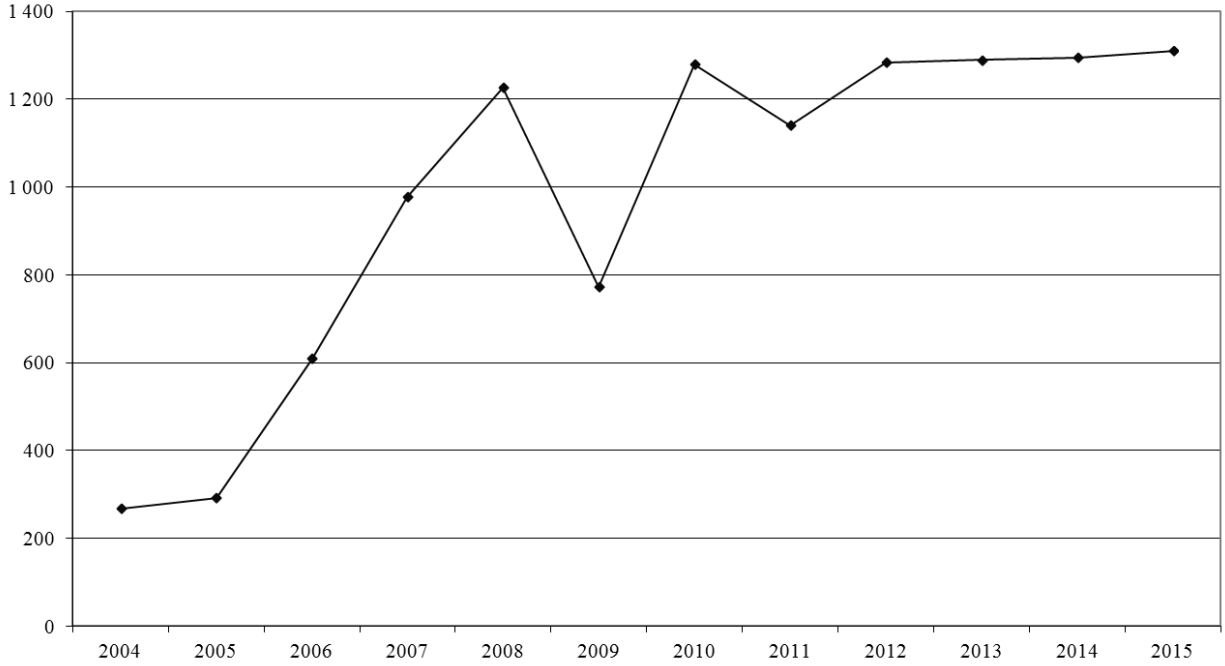
Source: Authoring

Рисунок 5

Себестоимость 1 т медного концентрата на предприятии «Эрдэнэт» в 2004–2015 гг., долл. США

Figure 5

Cost of 1 tonne of copper concentrate at Erdenet in 2004–2015, USD



Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 6

Матрица взаимных корреляций

Figure 6

Cross-correlation matrix

	X_1	X_2	X_3	X_4
X_1	**1**	–	–	–
X_2	0,769465	**1**	–	–
X_3	0,653637	0,842856	**1**	–
X_4	0,82988	0,760447	0,694914	**1**

Источник: авторская разработка

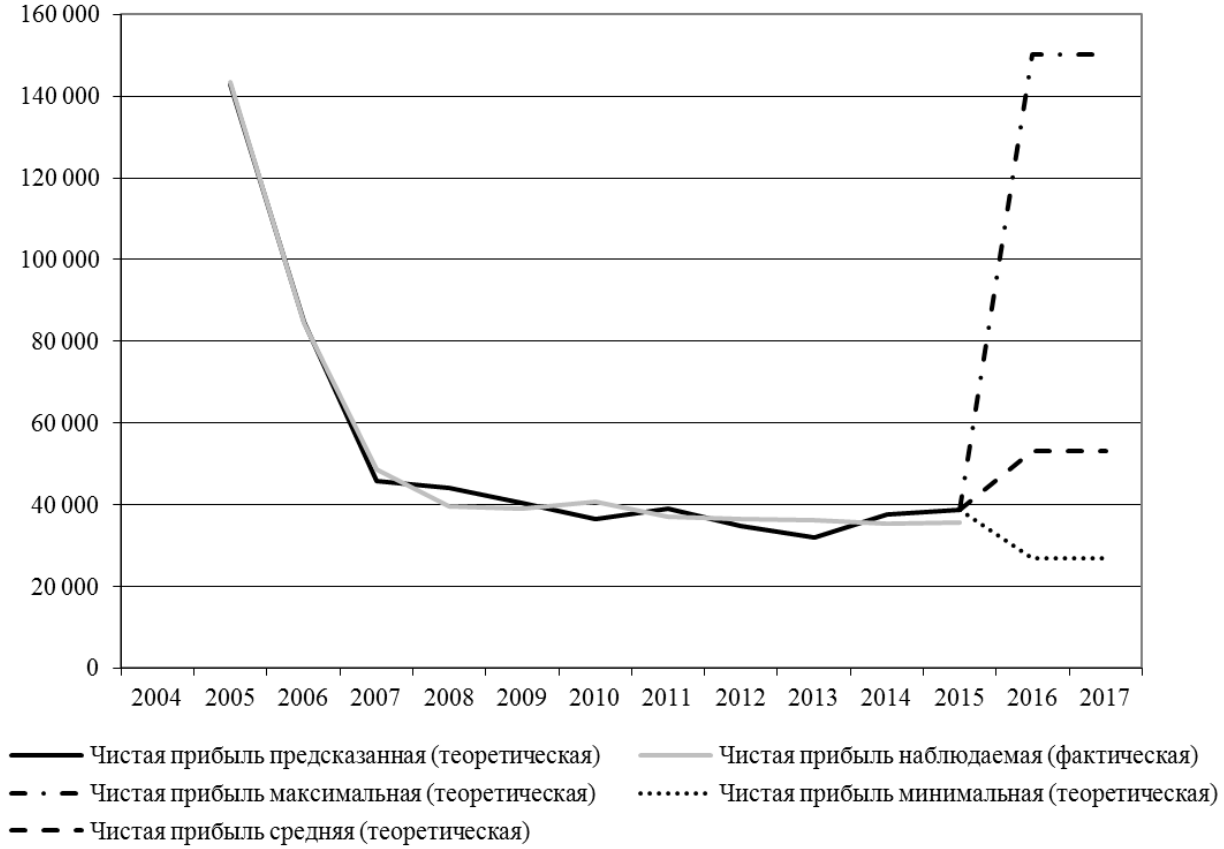
Source: Authoring

Рисунок 7

Линии прогнозов для максимальной, минимальной и средней чистой прибыли (2004–2017 гг.), тыс. долл. США

Figure 7

Forecasts of maximum, minimum, and average net profit (2004–2017), thousand USD



Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Список литературы

1. *Новоселова И.Ю.* Теоретико-практические аспекты исчерпания природных ресурсов и их замещение // Вестник университета (государственный университет управления). 2014. № 4. С. 125–129.

2. *Яшалова Н.Н.* Стимулирование применения природоохранных и ресурсосберегающих технологий промышленными предприятиями // Вестник УрФУ. Сер.: Экономика и управление. 2011. № 3. С. 111–118.

3. *Hamilton K., Withagen C.* Saving Growth and the Path of Utility. *Canadian Journal of Economics*, 2007, vol. 40, iss. 2, pp. 703–713. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.00427.x

4. Research Tools in Natural Resource and Environmental Economics. Ed. by A.A. Batabyal, P. Nijkamp. London, World Scientific Publishing, 2011, 400 p.

5. *Новоселова И.Ю.* Моделирование влияния внешних факторов на замещение природных ресурсов // Экономика природопользования. 2015. № 2. С. 25–33.

6. *Гусев А.А*. Основы модернизации эколого-экономического развития // Экономика природопользования. 2012. № 2. С. 40–47.

7. *Гусев А.А*. Модернизация макропоказателей в «зеленой» экономике: модельный аспект // Экономика природопользования. 2015. № 1. С. 42–47.

8. *Потравный И.М., Мотосова Е.А.* Экономические механизмы реализации экологической политики в сфере недропользования // Горный журнал. 2014. № 12. С. 27–30.

9. *Яшалова Н.Н.* «Зеленая» экономика как основа эколого-экономического устойчивого развития регионов // Вестник УрФУ. Сер.: Экономика и управление. 2013. № 2. С. 81–94.

10. *Hartwick J.M.* Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources. *The American Economic Review*, 1977, vol. 67, no. 5, pp. 972–974.

11. *Новоселова И.Ю.* Комплексная оценка эколого-экономической эффективности // Экономика природопользования. 2013. № 6. С. 16–24.

12. *Вега А.Ю., Фоменко А.А., Потравный И.М.* Ресурсосбережение как фактор повышения экологической и энергетической эффективности экономики и обеспечения социальных стандартов жизни населения // Плехановский научный бюллетень. 2012. № 1. С. 45–60.

13. *Тулупов А.С., Кирсанов К.К.* Предотвращенный ущерб как дополнительная полезность на примере промышленных отходов // Материалы международной научно-практической конференции «25 лет СНГ: основные итоги, проблемы, перспективы развития». М.: ЦЭМИ РАН, 2016. С. 286–290.

14. *Лобковский В.А*. Оценка природно-ресурсного потенциала Российской Федерации с позиции регионального природопользования // Проблемы региональной экологии. 2011. № 6. С. 64–75.

15. *Turner R.K.* Sustainability: Principles and Practice. In: Sustainable Environmental Economics and Management: Principles and Practice. Chichester, Wiley, 1993, pp. 3–36.

16. *Потравный И.М., Даваахуу Нямдорж*. Экономическая оценка накопленного экологического ущерба при закрытии рудника горнообогатительного предприятия // Материалы III Всероссийской конференции «Экология. Экономика. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС)». Т. 2. Ростов н/Д: Южный федеральный университет, 2015. С. 505–510.

17. *Sukhorukova I.V., Likhachev G.G*. Optimization of Centralized Procurement Management of Subsidiaries of the State Corporation. *Nauka i Studia*, 2015, vol. 6, pp. 9–16.

18. *Гассий В.В.* Роль государственно-частного партнерства в обеспечении «зеленого» роста региональной экономики // Горизонты экономики. 2015. № 5. С. 56–68.

19. *Гассий В.В*. Региональные аспекты формирования механизмов обеспечения социальной ответственности бизнеса. М.: Экономика, 2014. 179 с.

20. *Потравный И.М*. Экологический аудит в России: современное состояние // Инвестиции в России. 1998. № 5. С. 46–48.

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

pISSN 2073-039X
eISSN 2311-8725

Mathematical Methods and Models

AN ECONOMIC-MATHEMATICAL MODEL OF THE IMPACT OF MINE'S ENVIRONMENTAL AND PRODUCTION CHARACTERISTICS ON THE PROFIT OF MINING ENTERPRISES: EVIDENCE FROM ERDENET MINING CORPORATION

Ivan M. POTRAVNYI[a,•], Davaakhuu NYAMDORJ[b], Irina V. SUKHORUKOVA[c], Gennadii G. LIKHACHEV[d]

[a] Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation
ecoaudit@bk.ru

[b] Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation
dabuk91@mail.ru

[c] Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation
suhorukovaira@yandex.ru

[d] INTERTECH, Moscow, Russian Federation
lihachev69@yandex.ru

[•] Corresponding author

Article history:
Received 3 July 2017
Received in revised form
4 August 2017
Accepted 10 August 2017
Available online
28 September 2017

JEL classification: O21, O32, Q56

Keywords: depletion, natural resources, environmental damage, mining company

Abstract

Importance The article discusses the use of off-balance ore and tailings as a resource base under depletion of ore reserves in the field, and offers an economic-mathematical model of environmental management that takes into account the degree of involvement and processing of overburden, tailings and other environmental and economic parameters, and their impact on the profit of mining enterprises.

Objectives The purpose of the study is to provide methodological substantiation and develop an economic-mathematical model of miner operations, which would consider the impact of ecological factors and production characteristics on enterprise's profit, to assess the impact of changes in technical characteristics of production units on the profit of the mining enterprise.

Methods The paper employs an optimization model of environmental management using computer modeling, and methods of statistical and regression analysis.

Results We offer an economic-mathematical model of the impact of environmental and production characteristics of mines on profit. The findings show that profit is strongly susceptible to changing values of stripping ratio, washability ratio, run-of-mine output, and investment.

Conclusions It is possible to increase profit through increasing the stripping ratio at the open-pit mine and washability ratio at the concentrating mill, i.e. on the basis of processing the accumulated off-balance ore. This is associated with decreasing the production of raw materials and investment.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2017

Please cite this article as: Potravnyi I.M., Davaakhuu Nyamdorj, Sukhorukova I.V., Likhachev G.G. An Economic-Mathematical Model of the Impact of Mine's Environmental and Production Characteristics on the Profit of Mining Enterprises: Evidence from Erdenet Mining Corporation. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2017, vol. 16, iss. 9, pp. 1759–1777. https://doi.org/10.24891/ea.16.9.1759

Acknowledgments

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects No. 15-02-00141a, No. 15-22-03003a(м).

References

1. Novoselova I.Yu. [Theoretical and practical aspects exhaustion of natural resources and their substitution]. *Vestnik Universiteta*, 2014, no. 4, pp. 125–129. (In Russ.)

2. Yashalova N.N. [Stimulation of conservation and resource-saving efforts of industrial enterprises]. *Vestnik UrFU. Ser.: Ekonomika i upravlenie = Bulletin of Ural Federal University. Series Economics and Management*, 2011, no. 3, pp. 111–118. (In Russ.)

3. Hamilton K., Withagen C. Saving Growth and the Path of Utility. *Canadian Journal of Economics*, 2007, vol. 40, iss. 2, pp. 703–713. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.00427.x

4. Research Tools in Natural Resource and Environmental Economics. Eds A.A. Batabyal, P. Nijkamp. London, World Scientific Publishing, 2011, 400 p.

5. Novoselova I.Yu. [Modeling the influence of external factors on substitution of natural resources]. *Ekonomika prirodopol'zovaniya = Nature Management Economics*, 2015, no. 2, pp. 25–33. (In Russ.)

6. Gusev A.A. [The modernization fundamentals of green economic development]. *Ekonomika prirodopol'zovaniya = Nature Management Economics*, 2012, no. 2, pp. 40–47. (In Russ.)

7. Gusev A.A. [Modernization of macroindicators in "green" economy: Model aspect]. *Ekonomika prirodopol'zovaniya = Nature Management Economics*, 2015, no. 1, pp. 42–47. (In Russ.)

8. Potravnyi I.M., Motosova E.A. [Economic mechanisms of environmental policy implementation in the sphere of subsoil use]. *Gornyi Zhurnal*, 2014, no. 12, pp. 27–30. (In Russ.)

9. Yashalova N.N. [Green economy as a basis of ecological and economic sustainable development of regions]. *Vestnik UrFU. Ser.: Ekonomika i upravlenie = Bulletin of Ural Federal University. Series Economics and Management*, 2013, no. 2, pp. 81–94. (In Russ.)

10. Hartwick J.M. Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources. *The American Economic Review*, 1977, vol. 67, no. 5, pp. 972–974.

11. Novoselova I.Yu. [Comprehensive assessment of environmental and economic efficiency of a new development]. *Ekonomika prirodopol'zovaniya = Nature Management Economics*, 2013, no. 6, pp. 16–24. (In Russ.)

12. Vega A.Yu., Fomenko A.A., Potravnyi I.M. [Resource conservation as a factor of increasing the ecological and energy efficiency of the economy and social standards of living of the population]. *Plekhanovskii nauchnyi byulleten'*, 2012, no. 1, pp. 45–60. (In Russ.)

13. Tulupov A.S., Kirsanov K.K. [Prevented damage as extra utility: The industrial waste case]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "25 let SNG: osnovnye itogi, problemy, perspektivy razvitiya"* [Proc. Int. Sci. Conf. The CIS is 25: Main Results, Problems, Prospects]. Moscow, CEMI RAS Publ., 2016, pp. 286–290.

14. Lobkovskii V.A. [Assessment of natural-resource potential of the Russian Federation with the position of regional nature management]. *Problemy regional'noi ekologii = Regional Environmental Issues*, 2011, no. 6, pp. 64–75. (In Russ.)

15. Turner R.K. Sustainability: Principles and Practice. In: Sustainable Environmental Economics and Management: Principles and Practice. Chichester, Wiley, 1993, pp. 3–36.

16. Potravnyi I.M., Nyamdorj D. [Economic evaluation of accumulated environmental damage at the mining site closure of mining and processing enterprise]. *Materialy III Vserossiiskoi konferentsii "Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem (SAMES)"* [Proc. 3rd All-Rus. Sci. Conf. Ecology. Economy. Informatics. System Analysis and Modeling of Economic and Ecological Systems]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2015, pp. 505–510.

17. Sukhorukova I.V., Likhachev G.G. Optimization of Centralized Procurement Management of Subsidiaries of the State Corporation. *Nauka i Studia*, 2015, vol. 6, pp. 9–16.

18. Gassii V.V. [Public-private partnership role in green regional economics' growth providing]. *Gorizonty ekonomiki*, 2015, no. 5, pp. 38–43. (In Russ.)

19. Gassii V.V. *Regional'nye aspekty formirovaniya mekhanizmov obespecheniya sotsial'noi otvetstvennosti biznesa* [Regional aspects of creating mechanisms to ensure social responsibility of business]. Moscow, Ekonomika Publ., 2014, 179 p.

20. Potravnyi I.M. [Ecological audit in Russia: Current status]. *Investitsii v Rossii = Investments in Russia*, 1998, no. 5, pp. 46–48. (In Russ.)

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.