

УДК 622.221.3

С. В. Лукичев, А. Л. Билин, Д. А. Торопов

Сравнение методов формирования экономической модели месторождения при определении границ карьера

S. V. Lukichev, A. L. Bilin, D. A. Toropov

Comparison of methods for formation of the economic model of the deposit in determining pit limits

Аннотация. На примере месторождения "Олений ручей" проведен сравнительный анализ методов формирования экономической модели месторождения: метода удорожания горных работ с глубиной и итерационный метод. Определены математические границы открытой разработки с использованием экономических блочных моделей в программном комплексе MineFrame. Полученные результаты доказали эффективность итерационного метода.

Abstract. The methods forming an economic model of the deposit have been comparatively analyzed on the case study of the Oleniy Ruchey deposit. The method of mining appreciation with deepening and the iterative method have been compared. The mathematic boundaries for the open mining have been determined using economical blocked models in the MineFrame software. The results received have approved the efficiency of the iterative method.

Ключевые слова: экономическая модель месторождения, конечные границы карьера, метод удорожания горных работ с глубиной, индивидуальный расчет затрат на транспортирование.

Key words: economic model of the deposit, final pit limits, method of mining appreciation with deepening, individual calculation of costs transportation.

Введение

Определение рациональных конечных границ открытой разработки является одной из наиболее важных, системообразующих задач, оказывающих определяющее влияние как на величину промышленных запасов, так и на технико-экономические показатели отработки месторождения. Традиционные методы определения границ карьеров, в основе которых лежат варианты кондиций и граничного коэффициента вскрыши, ушли в прошлое, и сегодня для решения этой задачи активно используются трехмерные блочные модели месторождений полезных ископаемых, в основе которых лежат качественные характеристики месторождений и экономические показатели процессов добычи и переработки руды. Использование компьютерных программ с алгоритмами поиска оптимальных границ карьеров предоставляет возможность оценивать месторождения с точки зрения получения максимальной прибыли от их разработки, учитывая индивидуальную ценность блоков в зависимости от содержания полезных компонентов и индивидуальные затраты на их подготовку, выемку и транспортирование.

На сегодняшний день при проектировании широко используется метод удорожания горных работ с глубиной, который недостаточно точно учитывает расстояния транспортирования отдельных блоков, что в свою очередь сказывается на точности оценки экономических показателей. Для повышения точности оценки предлагается использовать итерационный метод формирования экономической блочной модели месторождения, основанный на корректировке расстояний транспортирования блоков на различных стадиях оценки конечных границ карьера.

Для доказательства преимущества итерационного метода формирования экономической модели по отношению к методу, базирующемуся на коэффициенте удорожания горных работ с глубиной, выполнено их сравнение. Оно осуществлялось на примере месторождения апатит-нефелиновых руд "Олений ручей" с использованием программного комплекса MineFrame [1].

Для формирования экономических моделей месторождения использовались следующие данные:

- Геологическая блочная модель рудного тела (рис. 1, 2) [2].

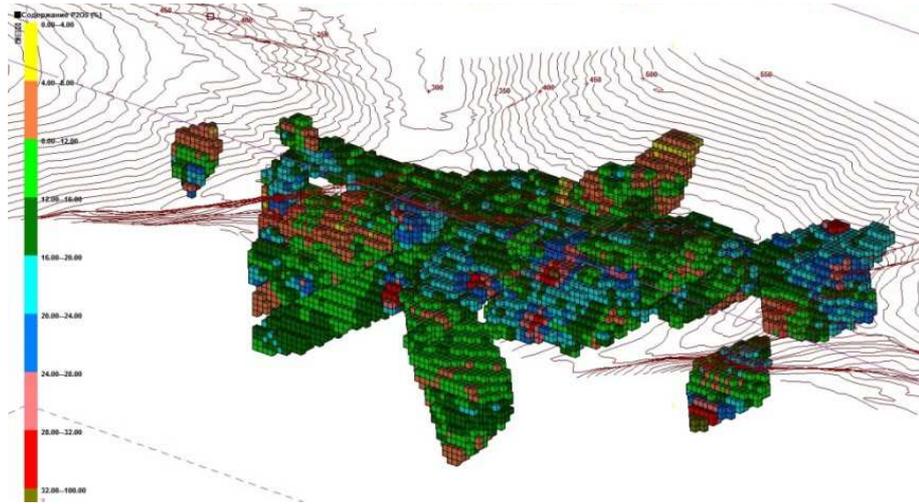


Рис. 1. Геологическая блочная модель верхнего яруса месторождения апатит-нефелиновых руд "Олений ручей"

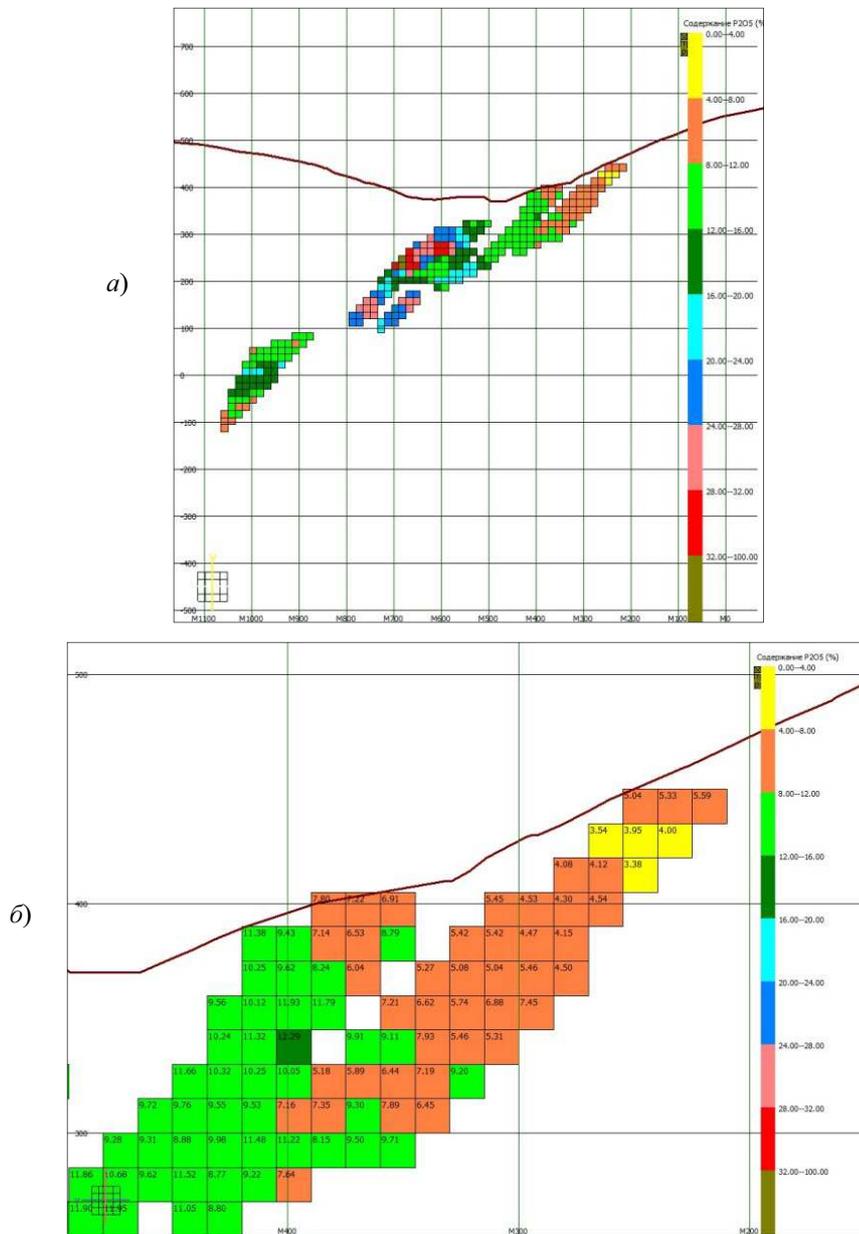


Рис. 2. Разрез геологической блочной модели рудного тела в мелком (а) и крупном (б) масштабе

- Оценочные экономические показатели проекта отработки месторождения (табл. 1)

Таблица 1

Оценочные экономические показатели проекта разработки

Показатель	Размерность	Значение
Цена товарной продукции	руб./т	5 000
Коэффициент к цене	дол. ед.	1
Коммерческие затраты	руб./т	70
Общекорбинатские затраты	руб./т	300
Содержание ПК в концентрате	%	40
Содержание ПК в хвостах	%	1,5
Потери	%	2
Разубоживание	%	18
Содержание ПК в разубоживающих породах	%	1
Стоимость транспортирования руды	руб./т · км	8
Стоимость транспортирования породы	руб./т · км	8,5
Концентрационный горизонт	м	315
Расстояние транспортирования до фабрики	м	3 000
Расстояние транспортирования до отвала	м	1 000
Уклон съездов	‰	80
Стоимость обогащения руды	руб./т	280
Стоимость добычи руды	руб./т	120
НДПИ	руб./т	30
Стоимость извлечения вскрыши	руб./т	80
Плотность руды	т/м ³	2,97
Плотность вскрыши	т/м ³	2,85

- Общие формулы формирования экономической модели для сравниваемых методов:

1) Фабричная цена товарной продукции:

$$Ц_{\text{ф}} = Ц_{\text{т.п}} \cdot k_{\text{ц}} - Z_{\text{к}} - Z_{\text{ок}},$$

где $C_{\text{т.п}}$ – цена товарной продукции; $k_{\text{ц}}$ – коэффициент к цене; $Z_{\text{к}}$ – коммерческие затраты; $Z_{\text{ок}}$ – общекорбинатские расходы.

2) Извлечение в концентрат:

$$I_{\text{к}} = \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot (\alpha_{\text{р}} - \alpha_{\text{х}})}{\alpha_{\text{р}} \cdot (\alpha_{\text{к}} - \alpha_{\text{х}})},$$

где $\alpha_{\text{р}}$ – содержание ПК в блоке; $\alpha_{\text{к}}$ – содержание ПК в концентрате; $\alpha_{\text{х}}$ – содержание ПК в хвостах.

3) Извлечение из недр:

$$I_{\text{н}} = \frac{(1 - \text{П} \%)}{(1 - \text{Р} \%)} \cdot \left(1 - \text{Р} \% \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{\text{р.п}}}{\alpha_{\text{р}}} \right) \right) \cdot 100,$$

где П – потери; Р – разубоживание; $\alpha_{\text{р.п}}$ – содержание ПК в разубоживающих породах.

4) Валовая ценность:

$$C_{\text{в}} = C_{\text{ф}} \cdot \frac{\alpha_{\text{р}}}{\alpha_{\text{к}}} \cdot I_{\text{к}} \cdot I_{\text{н}}.$$

Формирование экономической модели на основе метода удорожания горных работ с глубиной

Данный метод подразумевает удорожание стоимости вскрышных и добычных работ относительно концентрационного горизонта вследствие увеличения расстояния транспортирования, а также удорожание стоимости ведения горных работ из-за снижения производительности оборудования в стесненных условиях.

Для месторождения "Олений ручей" рассматривается коэффициент удорожания горных работ с глубиной, равный 1,3 на 100 метров или если более точно – 1,042 для каждого последующего горизонта относительно концентрационного.

Извлекаемая ценность 1 м³ руды с применением метода удорожания горных работ с глубиной:

$$Ц_p = (Ц_в - C_{об} - C_{д.р} - НДСП - 0,3 \cdot L_{тр.ф} \cdot Z_{тр.р}) \cdot \gamma_p \cdot k_{д.р} - (C_{и.в} + 1,25 \cdot L_{тр.о} \cdot Z_{тр.в}) \cdot \gamma_п \cdot (1 - k_{д.р}),$$

где $C_{об}$ – себестоимость обогащения руды; $C_{д.р}$ – себестоимость добычи руды с учетом затрат на транспортирование, причем с увеличением на коэффициент 1,042 относительно концентрационного горизонта; НДСП – налог на добычу полезного ископаемого; $L_{тр.ф}$ – длина транспортирования до фабрики; $Z_{тр.р}$ – затраты на транспортирование руды; γ_p – плотность руды; $k_{д.р}$ – коэффициент доли руды в блоке; $C_{и.в}$ – себестоимость извлечения вскрыши с учетом затрат на транспортирование, причем с увеличением на коэффициент 1,042 для каждого последующего уступа относительно концентрационного горизонта; $L_{тр.о}$ – длина транспортирования до отвала; $Z_{тр.в}$ – затраты на транспортирование вскрыши; $\gamma_п$ – плотность вскрыши.

Изменение себестоимости (C/c) вскрышных и добычных работ показано на рис. 3.

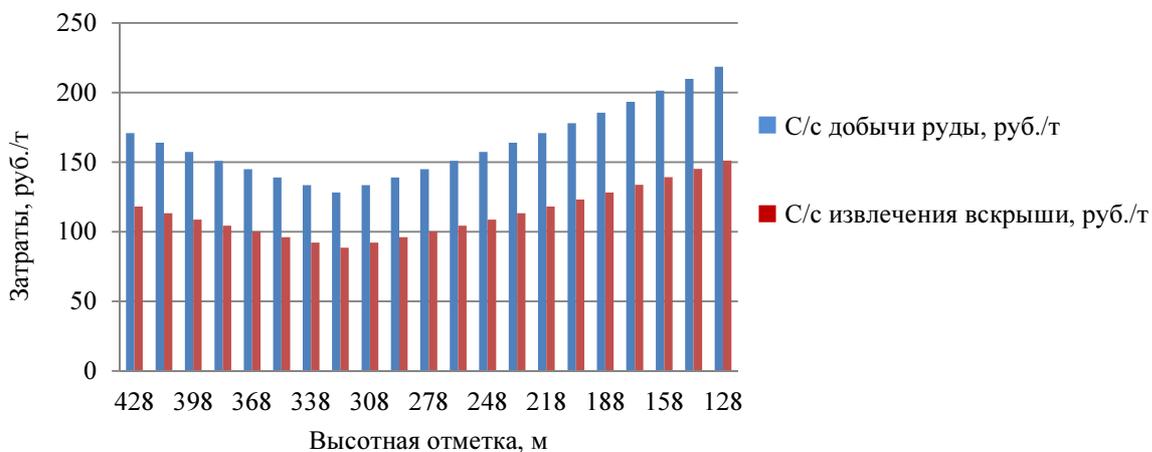


Рис. 3. График зависимости удорожания горных работ относительно концентрационного горизонта

Общая ценность рудных блоков, рассчитанная с применением метода удорожания горных работ, составила 36,0 млрд руб. Используя полученную экономическую блочную модель, с применением алгоритма Коробова [3], реализованного в программном комплексе MineFrame, были рассчитаны математические границы карьера на конец отработки (рис. 4).

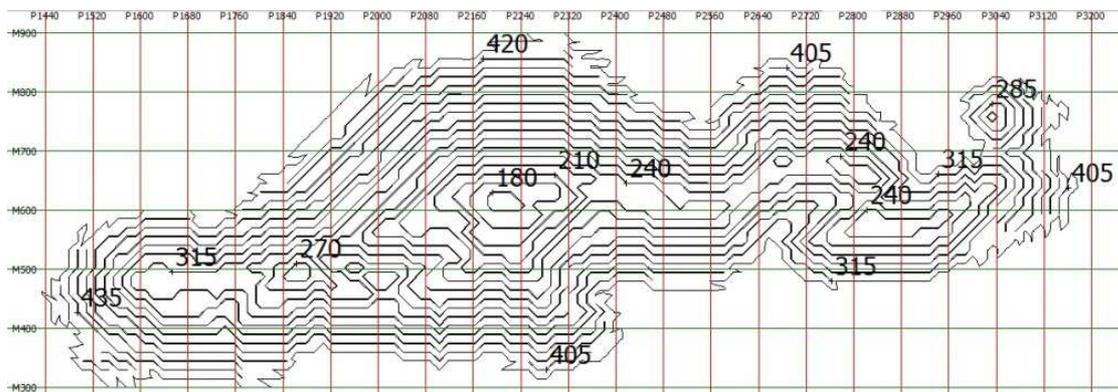


Рис. 4. Математические границы карьера на конец отработки, рассчитанные по экономической модели, сформированной с применением метода удорожания горных работ с глубиной

Объем руды в математических контурах, рассчитанных по экономической модели, сформированной с применением метода удорожания горных работ, равен 8,1 млн м³, или 24,1 млн т, объем извлекаемой вскрыши равен 29,5 млн м³, расчетная валовая прибыль составляет 12,0 млрд руб. (1/3 от общей ценности месторождения).

Формирование экономической модели с применением итерационного метода

Расчет экономической модели 1-й стадии оценки

На первой стадии оценки границ расчет индивидуальных расстояний транспортирования каждого блока производится по следующей схеме (рис. 5). Блоки каждого горизонта условно "перемещаются" в плане к центру тяжести рудного тела, далее к концентрационному горизонту под заданным уклоном и затем на фабрику или в отвал. Данный метод расчета учитывает индивидуальные расстояния транспортирования каждого блока, а также:

Затраты на транспортирование 1 т руды:

$$Z_{тр.р} = C_{тр.р} \cdot \left(0,3 \cdot \frac{\sqrt{(X_{ц.т} - X_{бл})^2 + (Y_{ц.т} - Y_{бл})^2}}{1000} + 1,25 \cdot \left(\frac{|Z_k - Z_{бл}|}{i} \right) + 0,3 \cdot L_{тр.ф} \right),$$

где $C_{тр.р}$ – стоимость транспортирования руды; Z_k – отметка выезда на поверхность; $Z_{бл}$ – координата Z центра блока; i – уклон съездов; $X_{ц.т}$ – координата X центра тяжести рудного тела; $X_{бл}$ – координата X центра блока; $Y_{ц.т}$ – координата Y центра тяжести рудного тела; $Y_{бл}$ – координата Y центра блока; $L_{тр.ф}$ – расстояние транспортирования от выезда на поверхность до фабрики.

Затраты на транспортирование 1 т вскрышной породы:

$$Z_{тр.п} = C_{тр.п} \cdot \left(0,3 \cdot \frac{\sqrt{(X_{ц.т} - X_{бл})^2 + (Y_{ц.т} - Y_{бл})^2}}{1000} + 1,25 \cdot \left(\frac{|Z_k - Z_{бл}|}{i} \right) + 0,3 \cdot L_{тр.о} \right),$$

где $C_{тр.п}$ – стоимость транспортирования вскрышной породы; $L_{тр.о}$ – расстояние транспортирования от выезда на поверхность до отвала.

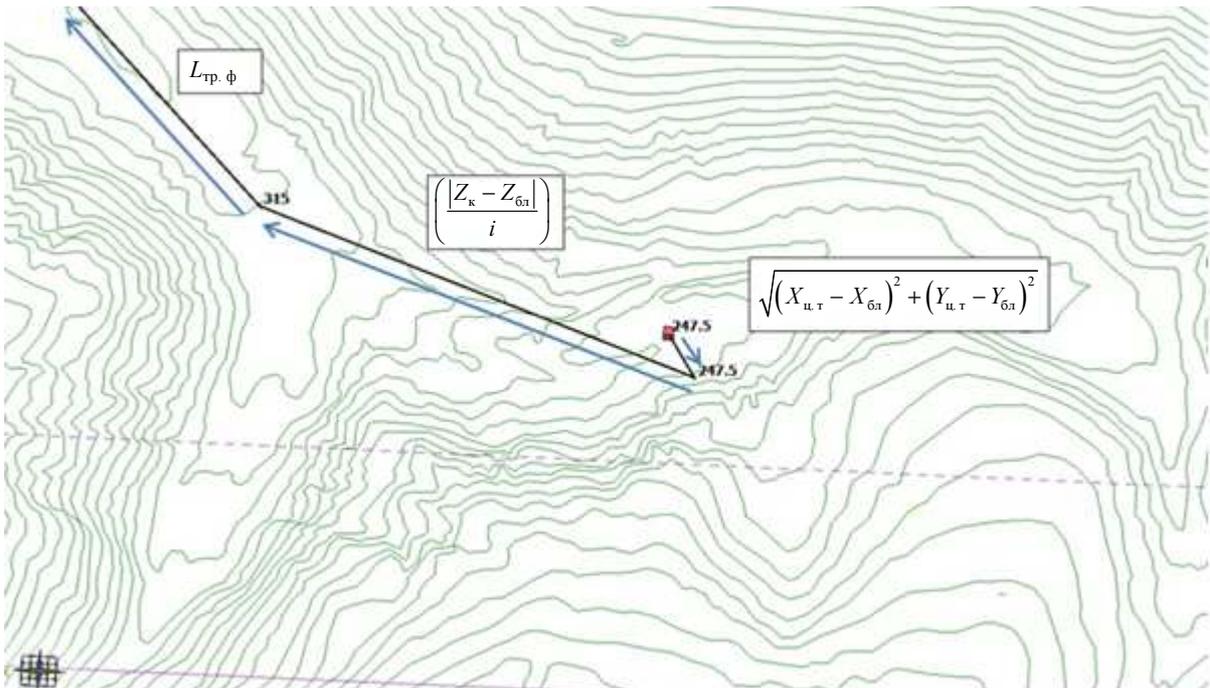


Рис. 5. Схема расчета расстояния транспортирования на 1-й стадии экономического расчета

Извлекаемую ценность 1 м³ руды 1-й стадии оценки:

$$C_p = (C_v - C_{об} - C_{д.р} - \text{НДПИ} - Z_{тр.р}) \cdot \gamma_p \cdot k_{д.р} - (C_{и.п} + Z_{тр.п}) \cdot \gamma_n \cdot (1 - k_{д.р}),$$

где $C_{об}$ – себестоимость обогащения руды; $C_{д.р}$ – себестоимость добычи руды без учета затрат на транспортирование; НДПИ – налог на добычу полезного ископаемого; γ_p – плотность руды; $k_{д.р}$ – коэффициент доли руды в блоке; $C_{и.в}$ – себестоимость извлечения вскрыши без учета затрат на транспортирование; γ_n – плотность вскрыши.

Ценность (прибыль от добычи и переработки) рудных блоков, 1-й стадии оценки по методу итерационной оценки, составляет 49,2 млрд рублей, что на 37 % больше, чем с применением метода

удорожания горных работ с глубиной. На основании экономической блочной модели 1-й стадии оценки были рассчитаны границы на конец отработки (рис. 6).

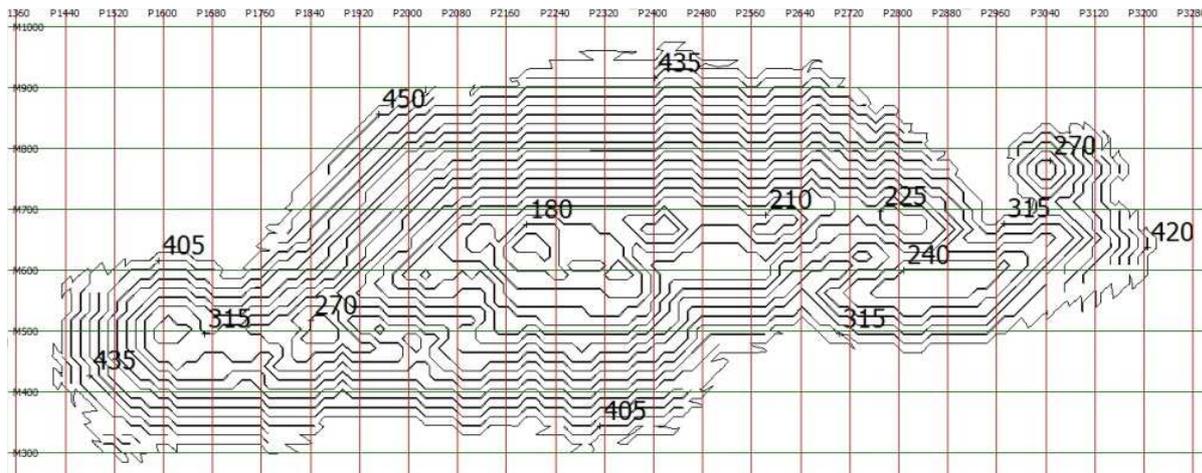


Рис. 6. Границы на конец отработки, рассчитанные по экономической модели 1-й стадии оценки

Объем руды в границах 1-й стадии оценки равен 10,1 млн м³, или 30 млн т (на 25 % больше, чем в границах, полученных с использованием метода удорожания), объем извлекаемой вскрыши равен 46,1 млн м³ (на 35 % больше, чем в границах, полученных с использованием метода удорожания), расчетная прибыль составляет 23,0 млрд рублей (что составляет 47 % от общей ценности месторождения).

Расчет экономической модели 2-й стадии оценки

На 2-й стадии уточняются расстояния транспортирования блоков в границах 1-й стадии оценки контура карьера (рис. 7).

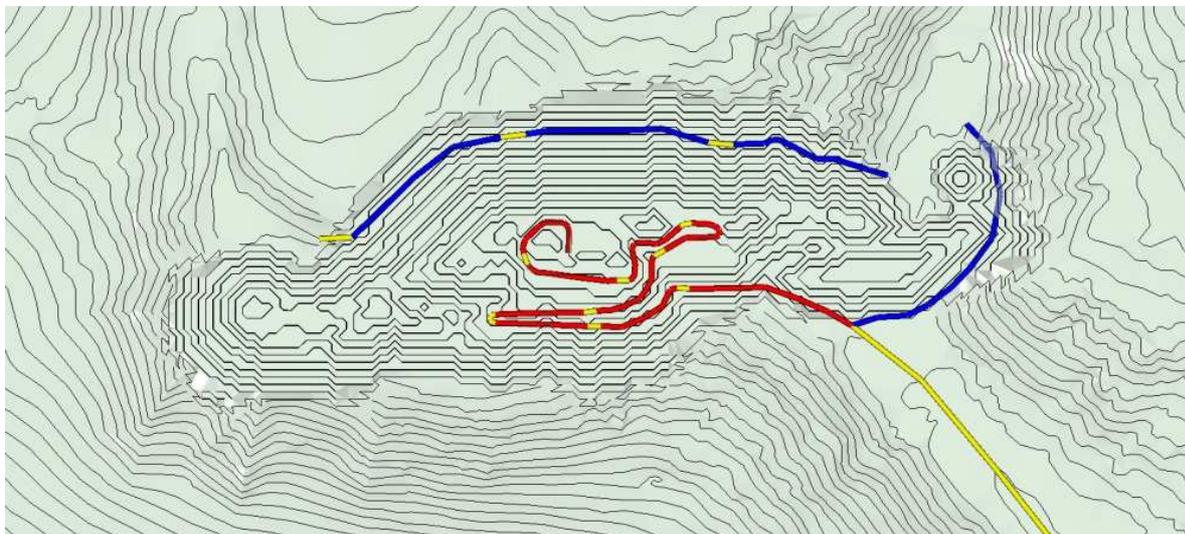


Рис. 7. Предполагаемая схема транспортирования блоков в границах первой стадии

Для расчета приведенных длин транспортирования 2-й стадии используется формула:

$$L_{тр.п} = 0,3 \cdot \frac{\sqrt{(X_c - X_{бл})^2 + (Y_c - Y_{бл})^2}}{1000} + 1,25 \cdot L_{тр.с} + 0,3 \cdot L_{пл.усп} + 0,3 \cdot L_{тр.ф}.$$

Блоки каждого горизонта транспортируются к соответствующему этому горизонту съезду, далее по съездам на концентрационный горизонт с учетом площадок успокоения и затем на фабрику или в отвал.

На основании новых данных о затратах на транспортирование блоков производится перерасчет экономической блочной модели и делается оценка границ карьера на конец отработки.

Ценность рудных блоков 2-й стадии оценки составила 46,3 млрд рублей, что на 6 % меньше, чем в экономической модели 1-й стадии расчета. На основании экономической модели 2-й стадии оценки были уточнены границы карьера на конец отработки (рис. 8).

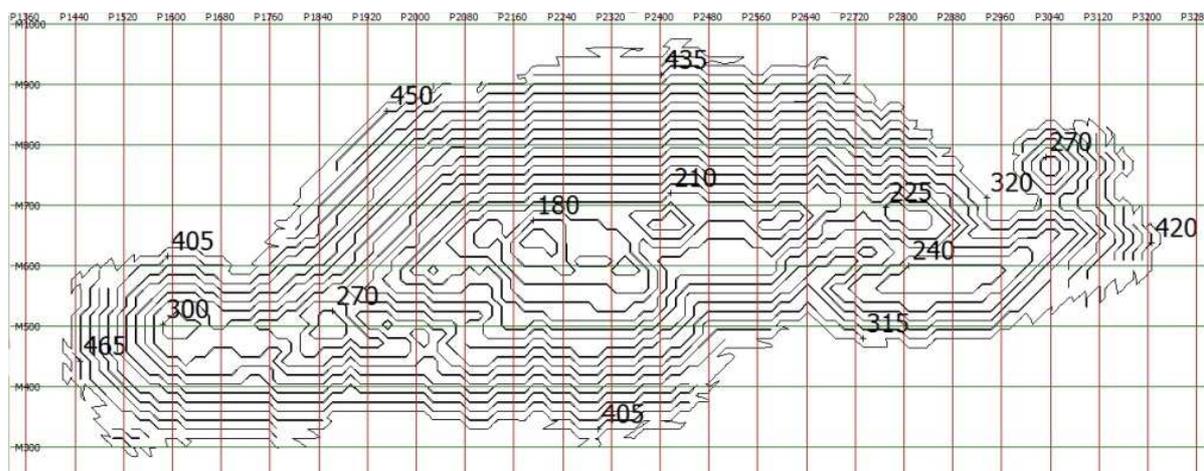


Рис. 8. Границы карьера на конец отработки, рассчитанные по экономической модели 2-й стадии оценки

Объем руды в границах 2-й стадии оценки равен 10,1 млн м³, или 30 млн т (совпадает с объемом руды 1-й стадии оценки), объем извлекаемой вскрыши равен 46,0 млн м³ (на 100 тыс. м³ меньше, чем в границах 1-й стадии оценки), расчетная прибыль составляет 22,9 млрд рублей (что составляет почти 50 % от общей ценности месторождения).

После 2-й стадии оценки границы открытой разработки не изменились, что указывает на то, что экономическая модель месторождения достаточно точная, ожидаемая прибыль от разработки максимальна, соответственно, эти границы можно принимать в качестве основы при моделировании карьера на конец отработки.

Заключение

Проверка итерационного метода определения границ карьера показала, что приемлемые результаты могут быть достигнуты при последовательном уточнении технико-экономических параметров открытых горных работ. Определение границ карьера следует производить в несколько итераций с постоянной корректировкой расстояний транспортирования и перерасчетом экономической модели месторождения.

Так как блочная модель представляет собой набор положительных (руда) и отрицательных (вскрыша) по ценности блоков, экономическая модель (простым суммированием ценностей блоков, включенных в карьерное пространство) используется и для оценки валовой ценности (дифференциальной горной ренты) при разработке месторождения. В табл. 2 представлены результаты оценки объемов руды и вскрыши, а также рассчитанной валовой прибыли в границах карьера "Олений ручей" на конец отработки, полученных с применением метода удорожания горных работ и итерационного метода. Оценка производилась по экономической модели месторождения 2-й стадии оценки.

Таблица 2

Сравнение результатов оценки границ

Название границ	Объем руды, млн т	Объем вскрыши, млн м ³	Прибыль, млрд руб.
Метод удорожания	24,1	29,5	20,5
Итерационный метод – 1-я оценка	30,0	46,1	22,8
Итерационный метод – 2-я оценка	30,0	46,0	22,9

Как видим, переход к итерационному методу формирования экономической модели позволяет увеличить объем руды на 20 %, а вскрыши – на 55 %, что приводит к увеличению валовой прибыли на 11 %.

Следует отметить, что переход от математических (сформированных по блочной модели) границ карьера к технологическим связан с некоторой потерей извлекаемой ценности, так как технологические границы должны отвечать дополнительным требованиям "плавности" бровок и правилам формирования системы транспортных коммуникаций.

Реализация данного итерационного подхода в программном комплексе MineFrame позволяет повысить точность экономической оценки параметров, а "прозрачность" формул расчета дает пользователю представление о том, на основании чего оптимальные экономические границы были получены.

Библиографический список

1. Наговицын О. В., Лукичёв С. В. Автоматизированные инструменты инженерного обеспечения горных работ в системе MineFrame // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 7. С. 184–192.
2. Лукичёв С. В., Наговицын О. В., Морозова А. В. Моделирование рудных и пластовых месторождений в системе MineFrame // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2004. № 5. С. 296–301.
3. Наговицын О. В., Билин А. Л., Смагин А. В. Оптимизация границ карьеров на основе алгоритма проф. С. Д. Коробова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2002. № 7. С. 244–246.

References

1. Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. Avtomatizirovannye instrumenty inzhenernogo obespecheniya gornyh rabot v sisteme MineFrame [Automated tools of engineering mining operations in the MineFrame system] // Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal). 2013. N 7. P. 184–192.
2. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Morozova A. V. Modelirovanie rudnyh i plastovyh mestorozhdeniy v sisteme MineFrame [Modeling of ore and bedded deposits in the MineFrame system] // Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal). 2004. N 5. P. 296–301.
3. Nagovitsyn O. V., Bilin A. L., Smagin A. V. Optimizatsiya granits karerov na osnove algoritma prof. S. D. Korobova [Optimization of pit limits based on prof. S. D. Korobov's algorithm] // Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal). 2002. N 7. P. 244–246.

Сведения об авторах

Лукичёв Сергей Вячеславович – Горный институт КНЦ РАН, д-р техн. наук; e-mail: lu24@goi.kolasc.net

Lukichev S. V. – Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci.; e-mail: lu24@goi.kolasc.net

Билин Андрей Леонидович – Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук; e-mail: bilin@goi.kolasc.net

Bilin A. L. – Mining Institute KSC RAS, Cand. of Tech. Sci.; e-mail: bilin@goi.kolasc.net

Торопов Дмитрий Анатольевич – Горный институт КНЦ РАН, аспирант; e-mail: toropov_dima@mail.ru

Toropov D. A. – Mining Institute KSC RAS, Ph.D. Student; e-mail: toropov_dima@mail.ru