УДК 622.271.3

А.Л.БИЛИН, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, bilin@goi.kolasc.net.ru*
Горный институт Кольского научного центра РАН, г.Апатиты Мурманской обл.

A.L.BILIN, *PhD in eng. sc., senior research assistant, bilin@goi.kolasc.net.ru*
Mining Institute of the Kola Research Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ПРОФЕССОРА С.Д.КОРОБОВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ КАРЬЕРОВ И ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМА ГОРНЫХ РАБОТ

Применение системы вложенных контуров при автоматизированном горно-геометрическом анализе возможно как при определении границ карьеров, так и при обосновании оптимального направления углубки с определением режима горных работ.

Ключевые слова: граничный коэффициент вскрыши, границы карьера, направление углубки, режим горных работ.

PECULIARITIES OF PROF. S.D.KOROBOV'S ALGORITHM APPLIANCE IN OPEN-PIT BOUNDARIES DETERMINATION AND MINING OPERATION REGIME JUSTIFICATION

System of embedded contours applied in computer-aided mining-geometrical analysis is appropriate both for open-pit boundaries determination and for optimal advance direction with justification of mining operation regime.

Key words: boundary stripping ratio, open-pit boundaries, advance direction, mining operation regime.

Определение границ карьеров является чрезвычайно сложной и вместе с тем чрезвычайно важной многоплановой задачей. Границы карьеров представляют собой один из ключевых системообразующих факторов, который влияет на многие другие параметры и показатели открытых горно-добывающих производств, определяет уровень затрат на разработку полезных ископаемых. Прежде всего они определяют размер запасов месторождения полезных (МПИ). С одной стороны, чем больше карьер, тем больше запасов руды в его границах, тем больше срок функционирования предприятия. С другой стороны, чем больше карьер, тем больше у него объем вскрыши и тем менее рентабельные запасы вовлекаются в эксплуатацию, снижая общую рентабельность.

Обоснованию граничного коэффициента вскрыши (КВ) как самостоятельной сложной проблеме посвящена работа [1]. В данной же статье рассматриваются пространственные аспекты применения автоматизированных методов при определении границ карьеров.

Напомним, что под граничной понимают пространственную прирезку при изменении границ карьера, которая является предельной по условию рентабельности. При переработке руды товарная продукция из этой прирезки должна окупить все понесенные затраты с минимально допустимой (нулевой) рентабельностью.

Определить однозначно заранее предельную прирезку для МПИ в сложных горно-геологических условиях невозможно, потому что границы карьера влияют на схему вскрытия и систему разработки, определяющих себестоимость добычи руды, которая, в свою очередь, используется при расчете граничного КВ. Получается закольцованная за-

висимость: бортовое содержание и граничный КВ влияют на технико-экономические показатели отработки, а те – на бортовое содержание и граничный КВ.

Разомкнуть корректно данную обратную связь можно за счет применения метода автоматизированного горно-геометрического анализа (АГГА) границ карьера построением системы вложенных контуров.

В Горном институте КНЦ РАН уже более 10 лет ведется разработка и апробация компьютерной моделирующей системы «MineFrame» [2]. Она представляет собой комплексное рабочее место геолога, маркшейдера, взрывника и горного инженера, решающих свои задачи в едином информационном поле модели подземного или открытого рудника.

В качестве программного приложения к «MineFrame» разработан блок автоматизированного определения границ карьеров «OptiKor» [3], опирающийся на теорию графов и алгоритм проф. С.Д.Коробова (Московский горный университет). Суть алгоритма заключается в том, что конкретный рудный блок можно включать в контур карьера, если его ценность остается положительной после извлечения всех пространственно связанных с ним блоков вскрышных пород на вышележащих горизонтах.

Алгоритм Коробова рассчитывает интегральное значение «параметризующей» функции в отличие от дифференцированного значения, получаемого по методу Ларчса – Гроссмана, широко используемого в зарубежной практике проектирования. Алгоритм Коробова считает в 2-3 раза быстрее западного аналога, обеспечивая тот же результат по границам карьера. Применение автоматизированных математических методов определения границ карьеров, в сравнении с графоаналитическими (плоскостными) методами, на сложноструктурных месторождениях позволяет более полно учесть пространственные свойства карьеров и существенно повысить эффективность открытой разработки месторождений.

Учитывая, что предварительно оцененные показатели кондиций (бортовое содержание условного основного полезного компонента и граничный КВ) из-за описанной выше «обратной связи» нельзя принимать за достоверные, при АГГА границ карьера предлагается использовать определение системы вложенных контуров, оптимальных для конкретных контурных КВ. При этом АГГА возможен в двух вариантах.

Если известны только контуры рудных тел и среднее содержание полезного компонента в рудах, то можно задавать различную ценность добываемой руды, получая набор граничных КВ.

Если же рудные тела характеризуются существенной изменчивостью содержания полезных компонентов при установленных закономерностях их распределения в пространстве, то создается одна модель ценности месторождения по блокам и задаются варианты затрат на извлечение вскрышных пород.

Полученная в результате АГГА система вложенных контуров позволяет построить график зависимости промышленных запасов от граничного КВ.

При монотонном изменении запасов для дальнейших технологических и технико-экономических проработок достаточно одного базового варианта границ карьера, близкого к предварительно оцененному граничному КВ. Если же вблизи оптимума границ наблюдается скачкообразное изменение запасов полезных ископаемых и объемов вскрыши, которое приводит к существенно различающимся между собой вариантам схем вскрытия, размещения отвалов и транспортирования вскрышных пород, то в качестве базовых необходимо рассматривать два варианта границ. Такие сильно различающиеся по структуре варианты карьеров требуют повышения качества проектных работ при их технологическом и экономическом сопоставлении. При этом многие иные промежуточные границы, которые можно было бы задать вариантным методом, оказываются изначально менее выгодными исключительно по фактору соотношения объемов руды и вскрыши в карьере.

После определения конечных технико-экономических показателей проекта следует переопределить замыкающие показатели (бортовое содержание и граничный КВ) и оценить направление и размер отклонения «результирующих» замыкающих показателей от исходных, для которых были выпол-

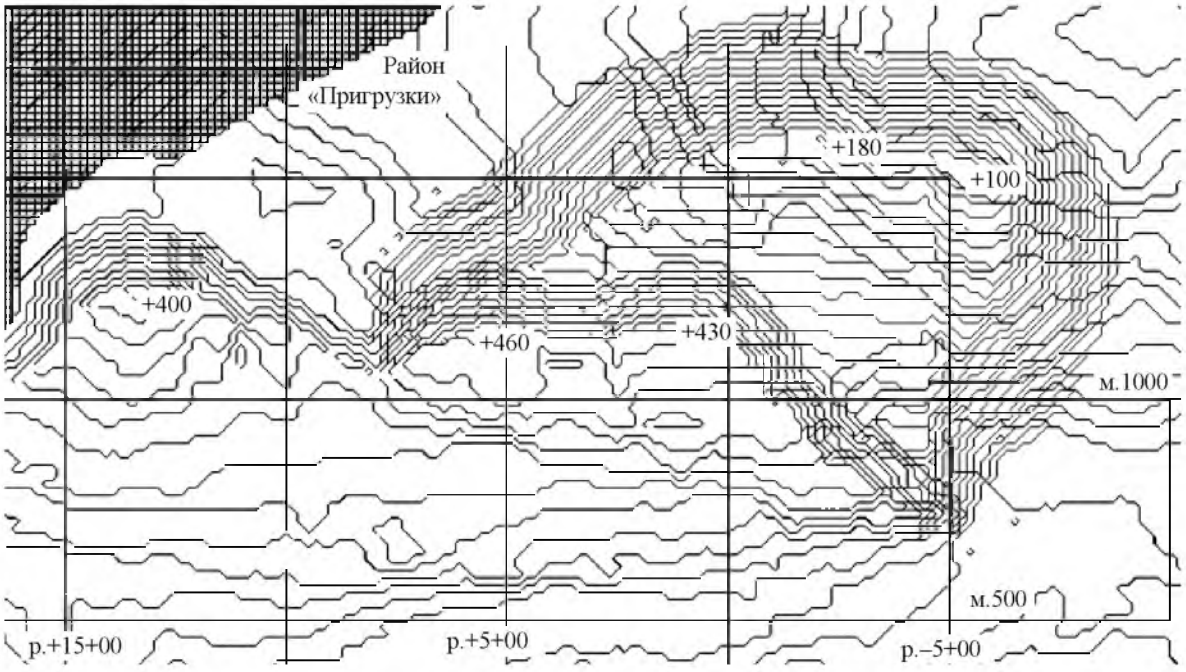


Рис.1. Математические модели АГГА для двух вариантов границ карьера при доработке месторождения Плато Расвумчорр

нены проектные проработки. По размеру смещения принимается решение о целесообразности или нецелесообразности выполнения технологических и экономических проработок для дополнительного варианта границ карьера.

Ситуация неочевидных пространственных прирезок границ карьеров была выявлена при исследовании параметров пространственных этапов доработки месторождений апатитовых руд (ОАО «Апатит»). Даже на таком сравнительно простом (по строению рудного тела) месторождении, как Плато Расвумчорр (рудник «Центральный» АО «Апатит») переход контурного КВ с 8 к 9 $м^3/м^3$ ведет к скачкообразному увеличению глубины карьера на 350 м, причем только на Восточном фланге месторождения (рис.1).

Следует отметить, что при АГГА значительное влияние на математическую модель карьера оказывали запасы, отработка которых предполагается подземным Расвумчоррским рудником. Для исключения влияния этих запасов на границы карьера был выделен район математической «пригрузки», в котором породным блокам были приданы большие отрицательные стоимости, что делало невозможным их включение в границы рационального карьера. Математические границы системы вложенных контуров, полученные в ходе АГГА, служат информационной графической подложкой для последующих моделирующих проработок. Ориентируясь на них, проектировщик в диалоговом режиме поуступно снизу-вверх отстраивает бровки уступов и систему транспортных коммуникаций, превращая их в привычный для горняков графический вид.

Аналогичная представленной на рис.1 ситуация неочевидных пространственных прирезок на сложноструктурных месторождениях была выявлена и при анализе условий доработки Коашвинского месторождения апатитовых руд.

Отказавшись от ручного плоскостного графоаналитического метода, проектировщики продолжают применять полуавтоматизированный метод, заключающийся в том, что компьютерные программы рассчитывают объемы запасов руды и вскрыши в заданных экспертно границах, реализуя, фактически, компьютеризированный метод вариантов.

При граничном КВ, равном 7,4 $м^3/м^3$, в ходе предпроектных проработок были рассмотрены два варианта границ карьера – «Первоочередный» и «Базовый» (см.таблицу).

Учитывая малое количество промышленных запасов руды и невозможность быстрого ввода в строй подземного рудника в качестве основного был принят «Базовый» вариант карьера.

Показатели вариантов границ карьера

Вариант границ	Отметка дна, м	Запасы руды, %	Объем вскрыши, %	Средний КВ, $м^3/м^3$
Первоочередный	–64	10,1	70	6,93
Базовый	–124	14,1	100	7,08
	Прирезка	4,0	30	7,45
Возможный	–88	10,5	46	4,38
Рекомендуемый	–220	27,7	172	6,21
	Прирезка	17,2	126	7,33

Примечание. Запасы руды и объем вскрыши рассчитаны от объемов вскрыши базового варианта.

Близость средних и граничных КВ косвенно указала на неоптимальность рассмотренных вариантов границ. В Горном институте КНЦ РАН были выполнены дополнительные исследования с использованием цифровой геологической модели месторождения. Автоматизированный горно-геометрический анализ позволил получить два дополнительных варианта карьера – «Возможный» и «Рекомендуемый». Следует отметить, что «Возможный» карьер включил в себя 74 % от запасов руды «Базового» варианта при 46 % объема вскрыши, а «Рекомендуемый» – 196 % запасов руды при 172 % объема вскрыши и 88 % от среднего КВ в «Базовом» карьере.

Результаты проведенных исследований были учтены при корректировке проекта отработки месторождения. Они продемонстрировали ограниченность перенесения ручных методов решения проектных задач в алгоритмы автоматизированного проектирования.

Если задача определения границ карьера компьютерным методом была теоретически решена сначала за рубежом, а затем С.Д.Коробовым в России, то математического решения задачи обоснования режима горных работ до настоящего времени нет. А между тем задача определения оптимального направления углубки с обоснованием режима горных работ является не менее значимой для проектирования карьеров, и для ее решения можно предложить применение АГГА.

Рассмотрим приведенный на рис.2 упрощенный пример для простого рудного тела и однозначного направления углубки, качественно демонстрирующий различия применения АГГА для определения границ карьера и обоснования режима горных работ.

Если АГГА границ карьера (рис.2, *а*) осуществлялся с углами наклона конечного борта карьера, то АГГА режима горных работ (рис.2, *б*) – с предельными углами наклона рабочей зоны карьера. Следует отметить, что на рис.2, *а* жирным выделен выбранный контур карьера, а на рис.2, *б* – искомый критический промежуточный контур, которому соответствует максимальный с начала разработки КВ.

Если АГГА границ карьера осуществлялся с помощью моделей геологии и исходной топографической поверхности, то АГГА режима горных работ – моделей топоповерхности, границ карьера на конец отработки и геологической модели рудных тел, попавших в карьерное пространство.

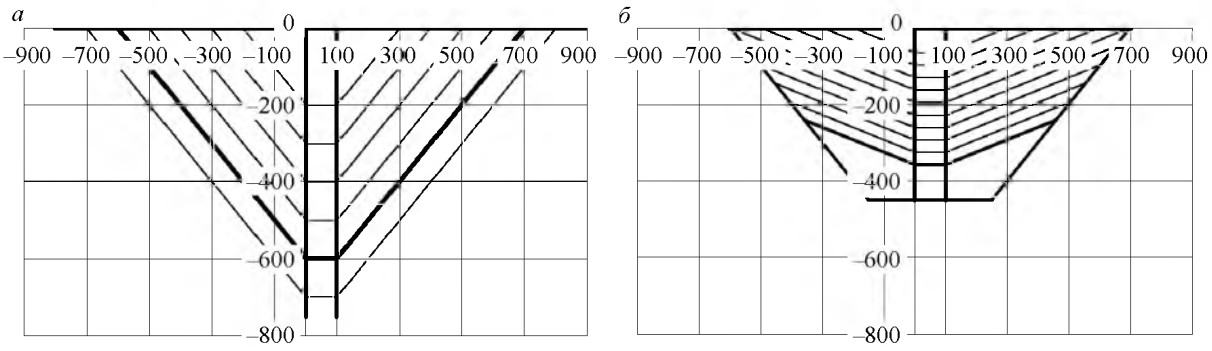


Рис.2. Принципиальная схема системы вложенных контуров при применении АГГА для определения границ карьера (*а*) и обоснования режима горных работ (*б*)

Принципиальное отличие от использованной для АГГА границ карьера модели заключается в создании не одной, а двух каркасных моделей «воздуха», полностью перекрывающих собой область моделирования. Каркасная модель «воздуха верхнего» в качестве нижней границы имеет модель топографической поверхности, а модель «воздуха нижнего» в качестве своей верхней границы содержит модель конечных границ карьера, вписанную в топоповерхность. Преобразуется и модель рудных тел, остаются лишь те их части, которые попали в контур карьера.

По каркасным моделям строятся регулярные блочные модели, информация интегральной «ценности» которых экспортируется в экономическую модель. Первоначально всем блокам математической модели задается отрицательное значение «–1», характерное для породных блоков. (Следует отметить, что возможно применение и более детальных моделей затрат на извлечение блоков из недр в функции от глубины разработки и крепости горных пород.) Сначала в экономическую модель экспортируется информация блочных моделей воздуха, которые замещают отрицательные значения «ценностей» блоков на нулевую, а затем – информация «ценностей» блочных моделей рудных тел. В результате экономическая модель принимает вид карьера с рудой, который находится в окружении «воздушных» блоков.

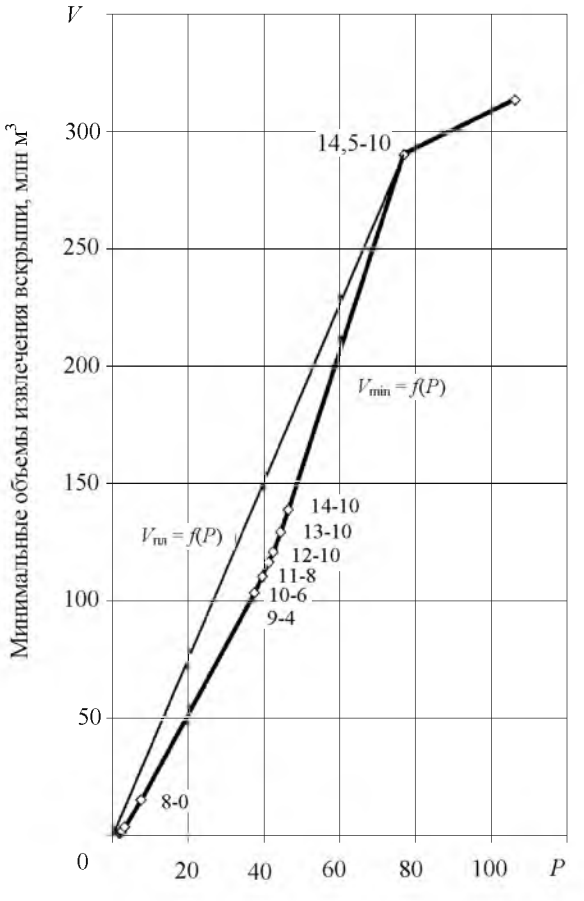


Рис.3. Интегральный график режима горных работ на одном из месторождений

При экспорте первоначальная «ценность» рудных блоков составляет, например, «+3». Проводится АГГА с контурным КВ = 3 $м^3/м^3$, по результатам которого получается набор рудных и породных блоков, удовлетворяющих заданному предельному условию. Далее относительную ценность рудных блоков меняют на «+4», «+5» и так далее, каждый раз повторяя процедуру построения новых математических границ карьера.

Одно из ключевых затруднений применения АГГА для определения режима горных работ связано с тем, что при задании контурного КВ, близкого к среднему, нижние рудные блоки «вытягивают» все вышележащие блоки, т.е. обоснование календарного графика режима горных работ не будет достигнуто. Для преодоления такого влияния блоки экономической модели карьерного пространства на нижних горизонтах преобразуются замещением их на «воздушные», т.е. им присваивается «нулевая» ценность (рис.2, *б*).

После «обнуления» одного-двух горизонтов процедуры увеличения относительной ценности руды и повторения АГГА для новых условий повторяются, пока опять не возникнет ситуация, при которой в границы очередного рабочего карьера скачкообразно не попадут все оставшиеся запасы.

Таким образом определяется максимальный с начала разработки эксплуатационный КВ, который характеризует режим горных работ. Результатом определения является система вложенных контуров, объемы руды и вскрыши в которых представляют собой точки классического интегрального (суммарного) графика $V_{min} = f(P)$ (рис.3) ре-

жима горных работ проф.А.И.Арсеньева (Горный университет). По графику можно определить параметры календарного графика режима горных работ $V_{пл} = f(P)$.

Следует отметить, что все важные изменения экономической модели рекомендуется сохранять под самостоятельными именами, например «6-2» (контурный КВ = 6 $м^3/м^3$ при «обнуленных» двух нижних горизонтах), что создает возможность не только повторить расчет в любой момент, но и осуществлять те или иные уточняющие преобразования модели.

Вторым вариантом формирования экономической модели для осуществления АГГА режима горных работ является создание одной модели ценности рудных блоков при осуществлении корректировок за счет изменения отрицательной «ценности» породных блоков. В обоих случаях результатом расчета будет являться система вложенных контуров, которые необходимо использовать при развитии карьерного пространства как промежуточные рабочие положения.

Очевидно, что применение АГГА режима горных работ на рудных телах сложной формы является методом однозначного определения рационального направления углубки и обоснования параметров режима горных работ.

Обобщая, можно сказать, что автоматизированный горно-геометрический анализ границ карьера с построением системы вложенных контуров позволяет более детально выявить закономерности изменения запасов руды в границах карьера в зависимости от граничных условий. Применение же АГГА для обоснования режима горных работ является довольно простым и наглядным инструментом определения рационального направления углубки, особенно в сложных горно-геологических условиях, и обоснования режима горных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Билин А.Л.* Обоснование перехода от натуральных экономических кондиций к расчетным // Горное дело в Арктике: 8-й международный симпозиум. Апатиты, 20-23 июня 2005. СПб: Изд-во Ивана Федорова, 2005. С.252-256.

2. *Лукичев С.В.* Моделирование рудных и пластовых месторождений в системе MineFrame / С.В.Лукичев, О.В.Наговицын, А.В.Морозова // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 5. С. 296-301.

3. *Наговицын О.В.* Оптимизация границ карьеров на основе алгоритма проф.С.Д.Коробова / О.В.Наговицын, А.Л.Билин, А.В.Смагин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002.№ 7. С.244-246.

REFERENCES

1. *Bilin A.L.* Substantiation of transition from natural economic conditions to the calculated ones. Mining in the Arctic Regions: 8 Int.Symp. Apatity, 20-23 June 2005. Saint Petersburg: Publ. Ivan Fyodorov. 2005. P.252-256.

2. *Lukichen S.V.*, *Nagovitsyn O.V.*, *Morozov A.V.* Modeling of ore and bedded deposits in the MineFrame System// Mining Information Buletin. 2004. N.5. P.296-301.

3. *Nagovitsyn O.V.*, *Bilin A.L.*, *Smagin A.V.* Optimization of open-pit mine bounda ries based on prof. S.D.Korobov algorithm// Mining Information Buletin. 2002. N.7. P.244-246.