ОПТИМИЗАЦИЯ ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ КАРЬЕРА

Н.Г. Бесимбаев, А.А. Нагибин

Карагандинский государственный технический университет, Караганда,
Республика Казахстан

Использование современных компьютерных программ позволяет создавать этапы развития горных работ установлением оптимальной последовательности извлечения блоков модели месторождения. Критерием для процесса динамического программирования является минимальное отношение объемов горной массы к объему руды всех типов. При проектировании этапов развития учтены основные параметры системы разработки месторождения Бестюбе, горно-геологические условия залегания полезного ископаемого, физико-механические свойства пород, рабочие параметры горно-добычного и транспортно-го оборудования, используемого при производстве работ. Для оптимизации необходимо построить экономическую модель месторождения, добавив в имеющуюся геологическую модель соответствующие параметры. Моделирование месторождения начиналось с создания каркасных моделей 11 рудных тел, которые затем заполнялись ячейками (блоками). Размер основного блока модели – 10 (вкрест простира-ния) $\times 20 \times 20$ м. Все оптимизационные расчеты проводятся на блочной модели месторождения, которая обычно импортируется в специализированную программу из горной компьютерной системы. Второй стадией оптимизации карьера является разбиение всего срока его отработки на этапы. Повышение уровня проектирования развития горных работ основывается на инновационных достижениях науки и техники в области информационных и геоинформационных технологий.

Ключевые слова: оптимизация карьеров, этапы развития горных работ, последовательность извлечения блоков модели месторождения, объемы горной массы, углы откосов бортов карьера.

OPTIMIZATION OF QUARRY DEVELOPMENT PHASES

N.G. Besimbaev, A.A. Nagibin

Karaganda State Technical University, Karaganda,
The Republic of Kazakhstan

The use of modern computer programs allows creating stages of mining operations through establishment of optimal sequence extraction of blocks field model. The criterion for the process of dynamic programming is the minimum volume ratio of the rock mass to the volume of all types of ore. When designing development stages the principal parameters of the Bestube field development, mining and geological conditions of minerals occurrence, physical and mechanical properties of rocks, the operating parameters of mining and transport equipment used in the operations are taken into account. For optimization there is a need to build an economic model of the field by adding relevant parameters to the existing geological model. A field modeling began with the creation of wireframe models of 11 ore bodies, which were then filled with cells (blocks). The size of the main unit model – 10 (across the strike) $\times 20 \times 20$ m. All optimization calculations are carried out on a block model of the field, which is usually imported in a specialized program from mining computer system. The second step of quarry optimization is to divide the entire period of its mining into stages. Improving the design level of mining development is based on innovative developments in science and technology in the field of information and geoinformation technologies.

Keywords: quarry optimization, stages of the development of mining operations, extraction sequence of field model blocks, volume of rock mass, quarry side slope gradient.

В настоящее время для проектирования и планирования открытых горных работ используется набор высокотехнологичных компьютерных инструментов с широким использованием различных методов оптимизации.

При разработке месторождений полезных ископаемых [1–5] размеры конечной продукции горного предприятия находятся под строгим ограничением различных производственных факторов. Одним из наиболее важных факторов является размер рабочего пространства карьера или шахты [6].

Сегодня вопросами оптимизации этапов развития открытых горных работ кроме австралийской компании Whittle Programming [7], выпустившей на рынок такие широко известные продукты, как Three-D, Four-D, OptiCut, Four-X, занимается новая компания Earthwork¹, которая выпустила несколько горных приложений высокого уровня, в том числе программу оптимизации карьеров по методу Лерча-Гроссмана – MaxiPit, которая вошла в состав пакета (системы) NPV Sheduler – программы оптимизации карьеров.

Появившийся в последние пять лет и интенсивно развивающийся программный комплекс NPV Scheduler² создан американским специалистом Болеславом Толминским. Он включает в себя много функций, автоматизирующих процессы проектирования и планирования карьеров. Комплекс имеет развитый современный интерфейс пользователя и возможность двустороннего импорта и экспорта информации, а также развитую современную графику с трехмерным визуализирующим.

Первой частью комплекса является программа MaxiPit, которая также использует алгоритм Лерча-Гроссмана (ЛГ)

и выдает результаты, в общем не отличающиеся от результатов программы Four-D. Оптимизация может быть произведена по одному из трех критериев:

- максимум потока наличности;
- максимум извлекаемых запасов;
- работа в заданных границах карьера.

В процессе оптимизации может быть определена оптимальная (по критерию *максимум NPV*) последовательность извлечения блоков модели по одному из двух критериев:

- максимум NPV. Программа будет искать последовательность извлечения блоков (внутри всех оболочек карьеров), которая дает самый высокий NPV;
- оптимизация усреднения руд.

Программа будет искать последовательность извлечения блоков (внутри всех оболочек карьеров), которая позволит выполнить установленные ограничения по качеству добываемой руды (однородность, содержание вредных примесей и т.п.).

Рассмотрим работу программы MaxiPit³ на примере оптимизации месторождения Бестюбе. Месторождение разведано скважинами колонкового и шарошечного бурения, канавами и подземными горными выработками.

Предварительным технико-экономическим обоснованием предусматривается раздельная во времени отработка разных типов руд: сначала будут извлекаться и перерабатываться кучным выщелачиванием окисленные руды, а затем – сульфидные – с предварительным использованием биологического выщелачивания [8].

Моделирование месторождения начиналось с создания каркасных моделей 11 рудных тел, которые затем заполнялись ячейками (блоками). Программа-оптимайзер, используя исходные данные,

¹ Программа оптимизации карьеров по методу Лерча-Гроссмана – MaxiPit в составе пакета NPV Sheduler.

² Программа оптимизации карьеров Four-X компании Earthwork.

³ Программный комплекс NPV Scheduler, разработанный компанией Datamine Software Limited.

рассчитывает для каждой ячейки модели дополнительную экономическую характеристику. Это величина чистой прибыли, которую получит предприятие, если оно добудет руду данного блока, переработает ее и продаст все извлеченные полезные компоненты по установленным на рынке ценам.

Все оптимизационные расчеты проводятся на блочной модели месторождения, которая обычно импортируется в специализированную программу из горной компьютерной системы, где она была создана. При импорте из Датамайн, например, модель, имеющая подъячейки, становится регулярной.

Одна из основных задач подготовки исходных данных для оптимизации – определение углов откоса бортов карьера [9].

В данном примере для относительно неглубокого карьера предусмотрены одинаковые углы откоса бортов для окисленных и скальных пород. По графикам изменения объемов горной массы и руды, а также извлекаемых металлов, потока наличности и NPV эксперт может выбрать оболочку, наиболее соответствующую его представлениям об оптимальном карьере (рис. 1).

В данном случае рассчитывались 10 оболочек, а выбраны наибольшие контуры карьеров, которые давали максимальные значения экономических параметров. Блочные модели этих карьеров были импортированы в систему Датамайн для последующего проектирования и подсчета извлекаемых запасов руды. Построение карьеров производилось в редакторе системы; ниже приведен геологический разрез модели месторождения (рис. 2).

В процессе предварительного (укрупненного) проектирования карьеров были рассчитаны объемы и качество извлекаемых запасов руды с учетом разубоживания и потерь. Это позволило оценить экономические параметры проекта и выполнить календарное планирование горных работ.

Рис. 1. План карьеров окисленных руд

Карьер сульфидных руд был разделен программой на три этапа отработки, которые примерно равны по объемам производства, позволяют учесть все горные ограничения и имеют такую последовательность извлечения запасов руды, которая дает максимальный экономический эффект [10]. На рис. 3 приведены графики изменения важнейших показателей работы карьера по этапам.

В качестве критерия для используемого программой процесса динамического программирования был выбран наиболее простой – минимальное отношение объемов горной массы к объему руды всех типов. Программа рассчитывает наиболее выгодный и реальный вариант последовательности отработки месторождения с учетом введенных ограничений.

План развития был составлен на весь период отработки сульфидного карьера (примерно 16 лет). На рис. 4 показан вид карьера сульфидных руд на конец 2010 и 2016 г. отработки.

График изменения основных показателей для данного варианта исходных данных карьера Бестюбе с учетом крите-

Рис. 2. Разрез геологической модели месторождения с контурами оптимальных карьеров

Рис. 3. Графики изменения важнейших показателей работы карьера по этапам

Рис. 4. Вид карьера сульфидных руд на конец 2010 и 2016 г. отработки

Рис. 5. График изменения во времени объемов добываемой горной массы, руды и денежной наличности

Рис. 6. Поперечные и продольный разрезы оптимального карьера Бестюбе с нанесением границ этапов отработки

рия минимального отношения объемов горной массы к объему руды всех типов и других критериев и ограничений приведен на рис. 5.

Второй стадией оптимизации карьера является распределение всего срока его отработки на этапы. Этапы отображают реальную последовательность отработки запасов и следуют всем введенным ограничениям и условиям, например наилучшему усреднению руды. Программа NPV Scheduler создает этапы делением (и небольшой последующей корректировкой) оптимальной последовательности извлечения блоков модели месторождения. Она объединяет в этап те блоки последовательности, которые близки территориально, позволяют удовлетворить ограничения по доступу горной техники и другие введенные пользователем условия.

Поперечные и продольный разрезы оптимального карьера Бестюбе с нанесением границ этапов отработки представлены на рис. 6.

Устанавливая плановое значение, равное 1,07 т/т, диктуем программе, чтобы она выбрала такую (наиболее эффективную по NPV) последовательность отработки запасов, которая позволит полностью обеспечить ОФ рудой и при этом выдержать коэффициент вскрыши как можно ближе к плановой величине.

Чтобы найти оптимальное решение для установленной целевой функции и ограничений, программа делит модель месторождения на элементарные объемы, называемые атомами, и строит дерево (граф) возможных решений. Узлы этого графа иллюстрируют положение горных работ в данный момент времени, а дуги соответствуют атомам. Информация, полученная из первого дерева, используется для построения второго, где дуги связаны со временем больше, чем атомы. Этот граф включает все решения, которые удовлетворяют поставленным условиям оптимизации. Если решений не существует, а такое случается достаточно часто, то ограничения несколько ослабляются. Оптимальный план рассчитывается методом динамического программирования.

После окончания работы программа (если решение найдено) создает таблицу календарного плана, в которой для каждого года (отдельно и в нарастающем итоге) приведены все показатели движения объемов горной массы и каждого сорта руды.

Если имеется несколько решений, удовлетворяющих всем требованиям, то на выходе получим набор практически идентичных планов. В результате можно увидеть вид карьера в конце каждого этапа отработки в окне визуализера (рис. 7).

Программа создает таблицу календарного плана, в которой для каждого года (отдельно и в нарастающем итоге) приве-

Рис. 7. График изменения объемов горной массы по годам работы карьера

Рис. 8. Вертикальное сечение оптимального карьера с нанесением границ годовой отработки

дены все показатели движения объемов горной массы и каждого сорта руды.

На рис. 8 приведен график ежегодных объемов пустых пород и руды на ОФ, включенных в оптимальный календарный план. Период планирования может быть каким угодно: недели, месяцы, кварталы и т.д. Но, выполняя очень детальные расчеты, следует учитывать размер блоков используемой экономической модели.

Для краткосрочного планирования следует работать на специально созданной трехмерной модели с небольшим размером основного блока.

В процессе выполнения задачи оптимизации работы с рудными складами ис-

пользуются оптимальные последовательности извлечения блоков модели, созданные предыдущим процессом. Оценки прибыли и NPV делаются на основе геологической модели и модернизированных экономических параметров в соответствии со временем реальной переработки и продажи произведенной продукции [11]. Эта программа должна работать совместно с модулем оптимизации календарного плана, чтобы увеличить эффективность горного проекта. Далее с помощью симплексного метода она находит оптимальное (по прибыли и NPV) распределение полученной руды по возможным направлениям использования: ОФ, КВ, рудные и породные склады.

Решающее значение в процессе оптимизации бортового содержания имеет важнейший тип руды и выбранный процесс его переработки. С учетом тесной связи бортового содержания и производительности карьера по горной массе проблема может быть также сформулирована как оптимизация производительности карьера или его рудопотоков. Процесс использует метод динамического программирования и позволяет в ряде случаев серьезно повысить эффективность рассчитанных перед этим календарного плана и программы управления рудными складами. По сути, это оптимизация складов, в которой дополнительно рас-

считываются наилучшие значения бортовых содержаний для каждого процесса переработки руды. В процессе расчетов оптимальная последовательность извлечения блоков модели (полученная из программы календарного планирования) остается неизменной. Перемены касаются только скорости извлечения запасов руды.

В процессе оптимизации программой формируются таблицы, в которых содержатся подробнейшие характеристики всех рудопотоков карьера для каждого планового периода, а также экономические оценки принятой стратегии и набор всевозможных графиков для иллюстрации результатов вычислений.

Список литературы

1. Мельников Н.В. Краткий справочник по открытым горным работам. – М.: Недра, 1982. – 456 с.
2. Открытые горные работы: справочник. – М.: Горное бюро, 1994. – 565 с.
3. Теория и практика открытых разработок / под общ. ред. Н.В. Мельникова. – М.: Недра, 1979. – 635 с.
4. Виницкий К.Е. Управление параметрами технологических процессов на открытых разработках. – М.: Недра, 1984. – 237 с.
5. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. – М.: Недра, 1974. – 520 с.
6. Попов В.Н., Бойков В.Н. Технология отстройки бортов карьеров. – М.: Недра, 1991. – 252 с.
7. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2001. – 672 с.
8. Правила технической эксплуатации (ПТЭ) рудников, приисков и шахт, разрабатывающих месторождения цветных, редких и драгоценных металлов. – М., 1980.
9. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 164 с.
10. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. – М.: Финансы и статистика, 1998. – С. 288.
11. Группа аналитиков MetalResearch. Краткий анализ мирового рынка серебра 2010–2011 [Электронный ресурс] // Аналитическая группа «Металлургические исследования». – URL: <http://www.metalresearch.ru/news12821.html> (дата обращения: 5.11.2012).

References

1. Mel'nikov N.V. Kratkii spravochnik po otkrytym gornym rabotam [Quick reference to open cast mining]. Moscow: Nedra, 1982. 456 p.
2. Otkrytye gornye raboty: spravochnik [Open cast mining: a guide]. Moscow: Gornoe biuro, 1994. 565 p.
3. Mel'nikov N.V. Teoriia i praktika otkrytykh razrabotok [Theory and practice of surface mining]. Moscow: Nedra, 1979. 635 p.
4. Vinitiskii K.E. Upravlenie parametrami tekhnologicheskikh protsessov na otkrytykh razrabotkakh [Manage settings technological processes on open developments]. Moscow: Nedra, 1984. 237 p.
5. Rzhetskii V.V. Protsessy otkrytykh gornykh rabot [Processes of open cast mining]. Moscow: Nedra, 1974. 520 p.
6. Popov V.N., Boikov B.N. Tekhnologiya otstroiki bortov kar'erov [Technology detuning of pit walls]. Moscow: Nedra, 1991. 252 p.

7. Olifer V.G., Olifer N.A. Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. Saint Petersburg: Piter, 2001. 672 p.
8. Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii (PTE) rudnikov, priiskov i shakht, razrabatyvaiushchikh mestorozhdeniia tsvetnykh, redkikh i dragotsennykh metallov [Rules of technical operation (PTE) mines and pits developing deposits of nonferrous, rare and precious metals]. Moscow, 1980. 114 p.
9. Metodicheskie ukazaniia po opredeleniiu uglov naklona bortov, otkosov ustupov i otvalov stroiashchikhsia i ekspluatiruemykh kar'eroi [Methodological guidelines by definition angles boards, scraps slopes and heap constructed and operated quarries]. Leningrad: VNIMI, 1972. 164 p.
10. Tsvetkov V.Ia. Geoinformatsionnye sistemy i tekhnologii [Geographic information systems and technology]. Moscow: Finansy i statistika, 1998. 288 p.
11. Kratkii analiz mirovogo rynka serebra 2010–2011 [A brief analysis of the global silver market 2010–2011]. Analiticheskaya gruppa "MetalResearch", available at: <http://www.metalresearch.ru/news12821.html> (accessed 5 November 2012).

Об авторах

Бесимбаев Нурлан Газисович (Караганда, Казахстан) – Карагандинский государственный технический университет (100027, г. Караганда, Бульвар Мира, 56; e-mail: alex_e1@mail.ru).

Нагибин Алексей Александрович (Караганда, Казахстан) – Карагандинский государственный технический университет (100027, г. Караганда, Бульвар Мира, 56; e-mail: alex_e1@mail.ru).

About the authors

Nurlan G. Besimbaev (Karaganda, The Republic of Kazakhstan) – Karaganda State Technical University (100027, Karaganda, Mira blvd., 56; e-mail: alex_e1@mail.ru).

Aleksei A. Nagibin (Karaganda, The Republic of Kazakhstan) – Karaganda State Technical University (100027, Karaganda, Mira blvd., 56; e-mail: alex_e1@mail.ru).

Получено 28.08.2013