© П.В. Васильев, А.А. Черноморец, 2008

УДК 55.681.3: 622.83

П.В. Васильев, А.А. Черноморец

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ ПРИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА БИФУРКАЦИИ

Рассмотрены вопросы оптимизации управления запасами месторождений полезных ископаемых при ведении открытых горных работ и решении задачи перспективного планирования добычи. Описаны существующие методы определения оптимальных контуров карьеров при заданных горно-геологических ограничениях и отмечены их недостатки. Предложена модификация алгоритма Лерчса-Гроссмана.

Семинар № 1

Введение

В задаче построения границ оптимального карьера при добыче полезных ископаемых открытым способом в настоящее время используется большое количество разнообразных программных продуктов, ориентированных на работу с геолого-экономической блочной моделью месторождения [2, 3]. В большинстве этих программ для решения оптимизационной задачи нахождения границ карьера используются, в основном, следующие алгоритмы: методы Лерчса-Гроссмана [4], метод Коробова [5], метод подвижного конуса, метод вариантов и различные их модификации [1]. В указанных алгоритмах задача нахождения решения сводится к разработке алгоритма построения некоторого рационального решения, то есть находится решение, являющееся оптимальным в некоторой подобласти области определения целевой функции, а не решается задача нахождения глобального оптимума.

В большинстве алгоритмов для построения оптимального карьера используется следующий принцип: если на некотором шаге алгоритма очередной рассматриваемый блок увеличивает значение целевой функции, например, увеличивает возможную прибыль, то он добавляется к множеству блоков карьера, что позволяет построить некоторое приближение к глобально-оптимальному карьеру, то есть рациональный карьер. Такой вариант работы алгоритмов приводит к оптимальному результату в случае симметричности и однородности модели месторождения, то есть при отсутствии в небольших подобластях месторождения различных значений как отрицательных блоков (вскрышные породы), так и положительных блоков (руда).

Анализ методов оптимизации

На месторождениях со сложной геологической структурой для решения задачи нахождения оптимального карьера следует анализировать все возможные сочетания блоков, то есть $2^N - 1$ сочетаний, где N – количество блоков в модели месторождения. Задачу можно сформулировать следующим образом:

Пусть C - множество всех возможных сочетаний блоков a_j месторождения, имеющих положительный вес

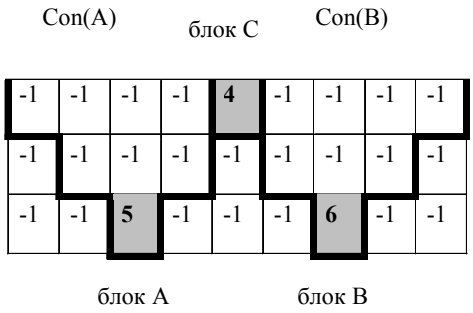


Рис. 1. Модель I месторождения

$V(a_j)$. Значение $V(Con(a_j))$ определяет стоимость добычи блока a_j, т.е. стоимость добычи всех блоков модели (конус), которые должны быть извлечены, прежде чем добыть данный блок a_j. Необходимо найти такое сочетание блоков $c_i \in C$, при котором достигается максимальное значение функции цели,

$$\sum_{j \in c_i} V(a_j) - \sum_{j \in c_i} V(Con(a_j)) \to \max.$$

Для задачи построения границ карьера можно указать верхнюю и нижнюю оценки значения функции цели с учетом добычи всех блоков месторождения. Предположим, что в месторождение входит N блоков, имеющих положительный вес. Оценка снизу имеет вид

$$\sum_{j=1}^{N} V(a_j) - \sum_{j=1}^{N} V(Con(a_j)).$$

Оценка сверху определяется следующим выражением

$$\sum_{j=1}^{N} V(a_j) - \sum_{j=1}^{N} Q(Con(a_j)),$$

где

$$Q(Con(a_j)) = \begin{cases} 0, \textit{если блок } a_j \\ \textit{принадлежит конусу} \\ \textit{другого блока } a_k \\ V, (Con(a_j)), \textit{в противном} \\ \textit{случае.} \end{cases}$$

В большинстве известных алгоритмов нахождения границ оптимального карьера блоки, подлежащие извлечению, определяются последовательно. Рассмотрим пример месторождения (рис. 1), в котором возникает неоднозначность выбора блока, добавляемого в оптимальный карьер.

Пусть в модели месторождения имеется хотя бы три блока, обладающих следующими свойствами:

1) На одном из нижних уровней модели имеется два блока A и B с положительным весом $V(A)$, $V(B)$. Имеется также блок C с положительным весом $V(C)$, принадлежащий пересечению конусов $Con(A)$ и $Con(B)$ блоков A и B

$$V(A) > 0,\ V(B) > 0,\ V(C) > 0,$$
$$C \subset \{Con(A) \cap Con(B)\}.$$

2) вес конусов блоков A и B положительный

$$V(Con(A)) > 0,\ V(Con(B)) > 0.$$

3) вес конуса блока А не равен весу конуса блока В

$$V(Con(A)) \neq V(Con(B)),$$

например, пусть

$$V(Con(A)) < V(Con(B)).$$

4) вес блоков, принадлежащих множеству $\{Con(A) \setminus Con(B)\}$, - отрицательный (вес блоков, принадлежащих конусу блока А и не принадлежащих конусу блока В).

5) вес блоков, принадлежащих множеству $\{Con(B) \setminus Con(A)\}$, - отрицательный.

В приведенной модели возникает неоднозначность выбора блоков, образующих карьер. В большинстве известных алгоритмов в оптимальный карьер добавляется произвольно один из блоков А или В рассмотренной модели, в то время как

-3	-1	0	0	0	0	-1	**-2**
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	**4**	**4**	**4**	**4**	-1	-1

A B C D

Рис. 2. Модель II месторождения

более предпочтительным является выбор блока B.

В модели произвольного месторождения блоков, с указанными свойствами, может присутствовать большое количество. В данной ситуации для нахождения блоков, входящих в оптимальный карьер, необходимо рассматривать все комбинации блоков.

В некоторых известных алгоритмах предлагается группировать блоки в более крупные ячейки и в дальнейшем их рассматривать. Можно привести пример модели II месторождения (рис. 2), в которой использование укрупненной ячейки, объединяющей элементарные блоки модели с одинаковыми свойствами, не позволяет найти границы оптимального карьера.

Так, в указанной модели (Рис. 2) извлечение различных сочетаний блоков дает разную прибыль:

- добыча блоков A, B,C, D – обеспечивает прибыль: 16-15 = 1,
- добыча блоков A, B,C – обеспечивает прибыль: 12-11 = 1,
- добыча блоков B,C, D – обеспечивает прибыль: 12-10 = 2,
- добыча блоков B,C – обеспечивает прибыль: 8-6 = 2.

В данном примере нельзя объединять блоки A, B,C, D в одну укрупненную ячейку, так как их добыча не обеспечивает максимальной прибыли.

Этот же пример модели месторождения иллюстрирует тот факт, что при наличии блоков с различными отрицательными весами необходимо исследовать достаточно большое количество сочетаний блоков модели. В указанном примере различные сочетания блоков определяют разное значение функции цели, например, возможной прибыли.

Рассмотрим другой алгоритм, в котором блоки модели перебираются послойно – сверху вниз. Все блоки с положительными весами $V(a_j)$, имеющими отрицательное значение веса конуса $V(Con(a_j))$, помечаются как занятые. Если $V(Con(a_j))$ имеет положительное значение, то выполняется поиск и преобразование последовательности взаимно-пересекаю-щихся отрицательных конусов между данным конусом и каким-либо отрицательным конусом, полученным на предыдущих шагах. Процедура поиска осуществляется до тех пор, пока не будут изучены все возможные последовательности конусов. В случае, если после этой процедуры вес изучаемого конуса остается положительным, то внутренние блоки конуса добавляются в структуру оптимального карьера. Проблема данного алгоритма состоит в том, что на этапе исследования всевозможных последовательностей между конусами возможно зацикливание поиска (Рис. **3**), а также возможна неоднозначность выбора требуемой последовательности между конусами (рис. 4), что может приводить к неоптимальности получаемого решения.

На Рис. **3** приведен пример поиска для конуса A (вид сверху на модель), в котором возникает циклическая последовательность пересекающихся отрицательных конусов, полученных на предыдущих шагах.

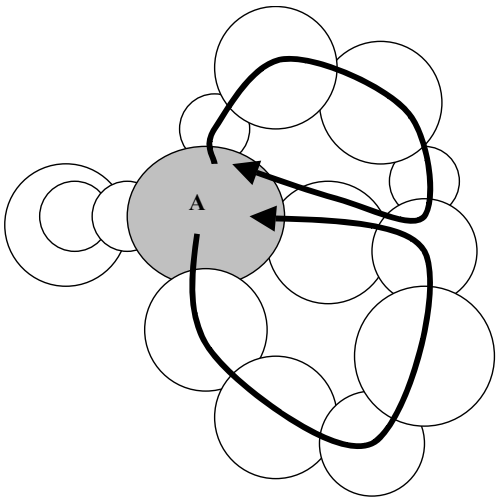


Рис. 3. Пример циклической последовательности пересекающихся конусов

На рис. 4 показан пример неоднозначного выбора между последовательностями пересекающихся конусов, имеющих одинаковый суммарный вес. Произвольный выбор на данном шаге последовательности конусов может в дальнейшем также привести к неоптимально построенному карьеру.

Алгоритм бифуркации

Для решения указанных выше проблем построения рационального карье-ра предлагается использовать алгоритм, в котором выбор блоков, добавляемых в структуру карьера, осуществляется в точках месторождения, одновременно принадлежащих большому количеству конусов, построенных для извлечения блоков с положительным весом. Назовем этот подход "алгоритм бифуркации", что отражает необходимость поиска в модели точек ветвления.

На первом шаге рассматриваемого алгоритма бифуркации для каждого блока модели месторождения, имеющего положительный вес $V(a_j)$, $j = 1,...,N$, строятся конусы, содержащие блоки, которые необходимо извлечь перед добычей блока $V(a_j)$, и определяются веса конусов $V(Con(a_j))$, $j = 1,...,N$, (суммируются веса как отрицательных, так и положительных блоков, входящих в конус). Далее выполняется поиск и выделение (добавление в структуру оптимального карьера) всех конусов, имеющих положительный вес. Поиск выполняется в направлении от самого глубоко расположенного блока с положительным весом к блокам расположенным на поверхности (снизу-вверх).

На следующем шаге осуществляется выделение конусов, имеющих квази положительный вес, то есть для определения веса конуса используются не выделенные на предыдущем шаге блоки (поиск выполняется сверху-вниз).

Во время поиска сверху-вниз квазиположительных конусов для выполнения процедур следующего шага алгоритма отмечаются блоки, конусы которых имеют отрицательный вес. На очередном шаге выполняется следующий упрощенный алгоритм:

а) пусть обнаружен конус *Con*(*A*), имеющий квази положительный вес, вычисленный без учета отмеченных блоков отрицательных конусов,

б) если среди ранее исследованных отрицательных

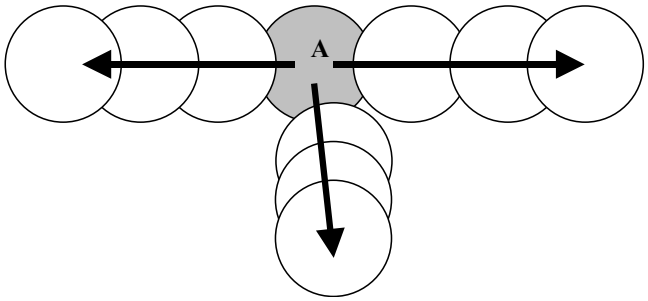
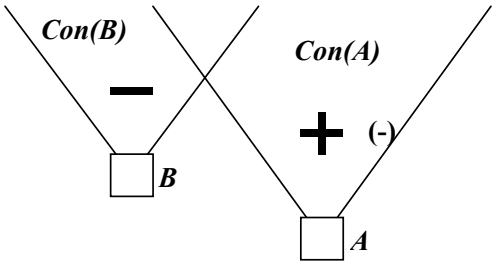


Рис. 4. Пример последовательностей пересекающихся конусов, имеющих одинаковый суммарный вес



конусов имеется конус *Con*(*B*), такой что (Рис. 6),

$Con(A) \cap Con(B) \neq \varnothing$, и

$V(Con(A) \cup Con(B)) > 0$,

то блоки конусов *Con*(*A*) и *Con*(*B*) выделяются в структуру оптимального карьера.

На данном шаге работы алгоритма завершены предварительные процедуры выделения блоков в структуру карьера.

Рассмотрим построение оценки стоимости V_0 карьера с использованием свойств точек бифуркации, то есть блоков месторождения, которые одновременно принадлежат нескольким конусам. Для каждого не выделенного блока вычислим кратность $Mult(a_j)$ его вхождения в конусы других блоков. Тогда оценка V_0 имеет вид

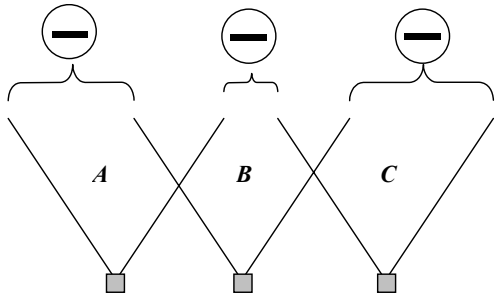


Рис. 5. Пример конусов и их блоков, которые не следует включать в оптимальный карьер

Рис. 6. Пример объединения конусов с положительным суммарным весом

$$V_0 = \sum_j V(a_j^+) - \sum_j V(a_j^-) + \\ + \sum_j (Mult(a_j^-) - 1) V(a_j^-)),$$

где a_j^- - блок, имеющий отрицательный вес, a_j^+ - блок, имеющий положительный вес.

На основании кратности точек бифуркации можно сформулировать условие, позволяющее определить блоки, которые никогда не будут включена в структуру оптимального карьера. Условие формулируется следующим образом: блок не будет принадлежать оптимальному карьеру, если имеем отрицательный суммарный вес блоков его конуса, которые не принадлежат другим конусам (рис. 6), то есть суммарный вес блоков, входящих в его конус и имеющих кратность равную единице, является отрицательным.

Непосредственно алгоритм бифуркации включает следующие шаги:

1. Упорядочить блоки c_j по величине кратности *Mult*(c_j) их вхождений во все возможные конусы.
2. Рассмотреть неисследованный и не входящий в оптимальный карьер блок c_j с максимальным значением кратности *Mult*(c_j).
3. Найти суммарный вес V' конусов, содержащих блок c_j - точку бифуркации (рис. 7).
4. Если вес V' конусов имеет положительное значение, то блоки месторождения, принадлежащие этим конусам, включаются в структуру опти-

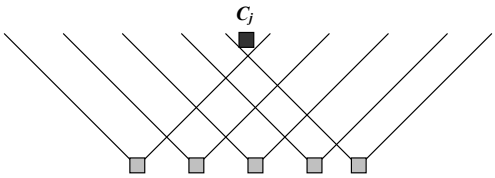


***Рис. 7. Пример конусов, содержащих точку бифуркации - блок* Cj**

мального карьера.

5. Действия шагов 2, 3 и 4 следует повторить для всех блоков.

Заключение

Рассмотренный алгоритм бифуркации позволяет исключить проблему перебора достаточно большого множества блоков, удовлетворяющих некоторым условиям, в поисках блока, который следует добавлять в структуру оптимального карьера.

Данный алгоритм указывает порядок исследования блоков месторождения для включения их в оптимальный карьер путём сочетания методов подвижного конуса, Лерчса-Гроссма-на и отсечения блоков с отрицательным потенциальным весом (стоимостью).

Программная реализация алгоритма позволяет получать на реальных блочных моделях оптимальные границы карьера, сравнимые по своим показателям с карьерами, получаемыми с помощью других известных алгоритмов, однако при его использовании расчеты выполняются на 10-30% быстрее в зависимости от геологической сложности строения, расположения рудных тел и размера месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арсентьев А.И.* Определение производительности и границ карьера. М.: Недра, 1970. - 320 с.
2. *Васильев П.В., Уиттл Д.* Построение экономической блочной модели месторождения при решении задачи оптимизации контуров карьера.// Материалы 4-го международного симпозиума / Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях. - Белгород: ВИОГЕМ, 1997. - С. 286-296.
3. *Капутин Ю.Е.* Информационные технологии планирования горных работ (для горных инженеров). – СПб.: Недра, 2004. – 424 с.
4. *Компьютеры* и системы управления в горном деле за рубежом /Ю.П. Астафьев, А.С. Зеленский, Н.И. Горлов и др. – М.: Недра, 1989. – 264 с.
5. *Наговицин О.В., Билин А.Л., Смагин А.В.* Оптимизация границ карьеров на основе алгоритма проф. С.Д. Коробова. // Горн. информ.-аналит. Бюлл / Моск. гос. горн. ун-т, 2002, - № 7. - С. 244-246. ГИАБ

Коротко об авторах

Васильев П.В. – кандидат технических наук, ФГУП ВИОГЕМ,
email: vassiliev@getos.belgorod.ru
Черноморец А.А. – кандидат технических наук, БелГУ,
email: chernomorets@bsu.edu.ru

Статья представлена семинаром № 1 научного симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *А.М. Гальперин.*