

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО
ОКОНТУРИВАНИЯ ПРИ ВАЛОВОЙ ОТРАБОТКЕ
ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Толобекова Б.Т.

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

Исследованию подвергается случай с равномерным ежегодным снижением бортового содержания и полной компенсацией запасов, предполагающий равенство сокращаемых в начале отработки запасов прирезаемыми в конце эксплуатации. В этом случае общие отработываемые запасы руды останутся теми же, что и в случае с неизменным бортовым содержанием. В начале отработки бортовое содержание принимается больше среднего, примерно к середине срока эксплуатации оно достигает среднего (оптимального при базовом варианте) значения и на завершающей стадии падает до своего минимального уровня. В соответствии с бортовым содержанием изменяется среднее содержание в запасах по годам отработки. Рассмотрим методику определения исходных величин при дифференциации бортового содержания.

В ранних работах наших исследований и других работах [1-3] исследовалась стратегия регулирования содержания в добываемой руде только путем изменения порядка отработки разнокачественных запасов, оконтуренных по одинаковой бортовой кондиции. На практике регулирование содержания в добываемой руде изменяется с помощью порядка отработки запасов лишь в ограниченных (когда позволяет технология отработки) пределах. В остальных случаях, добиться

более высокого содержания, в первые годы эксплуатации месторождения можно только путем применения дифференцированного бортового содержания, т.е. оставляя на первом этапе, наиболее бедные приконтурные запасы с содержанием ниже среднего бортового. Некоторая часть оставленных приконтурных запасов может быть сохранена и добыта на заключительном этапе эксплуатации. Однако, большая их часть все же будет потеряна. Но снижение кондиций во второй половине срока отработки месторождения компенсирует эти потери.

На рисунке 1 показан расчетная схема среднего содержания от C_0 до C_K .

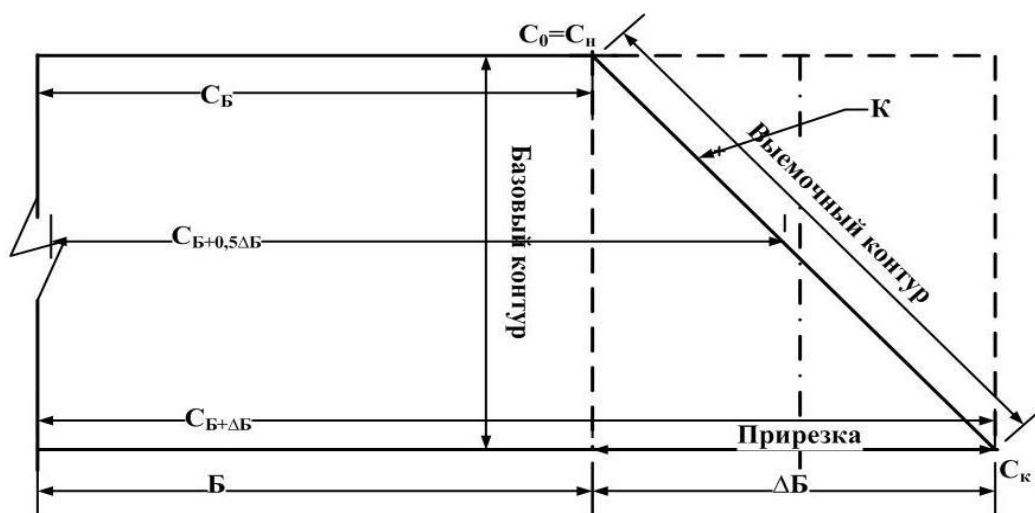


Рис.1. Расчетная схема среднего содержания в запасах (С) при одностороннем дифференцировании кондиций:

$$C = [C_B \cdot B + 2 \cdot C_{B+0,5\Delta B} \cdot \Delta B + C_{B+\Delta B} \cdot (B + \Delta B)] \div 4(B + 0,5 \cdot \Delta B) \quad (1)$$

ΔB - прирезка запасов при уменьшении бортового содержания от C_0 до C_K ;

C_B , $C_{B+0,5\Delta B}$ и $C_{B+\Delta B}$ – среднее содержание по вариантам оконтуривания при соответствующих бортовых содержаниях;

K – контур отработки при дифференцированном бортовом содержании от C_0 до C_K .

Исследуем, эффективна ли стратегия с применением дифференцированного по годам бортового содержания в оптимизационной постановке.

В качестве примера используется месторождение запасами отработки 10 млн.т. со средним содержанием полезных ископаемых 6 г/т. Воспользуемся обобщенными данными зависимости среднего содержания от изменения количества отрабатываемых запасов месторождений.

Статистическая обработка данных показала, что для месторождений полезных ископаемых $B < 10$ млн. т можно использовать формулу: $(C = 6,94 - 0,21 B + 11,6/B)$, а при $B > 10$ млн. т должны использоваться формула, определяющее среднее содержание в добываемых рудах по $C = 3,5 - 0,07 B + 34/B$. (рис.2).

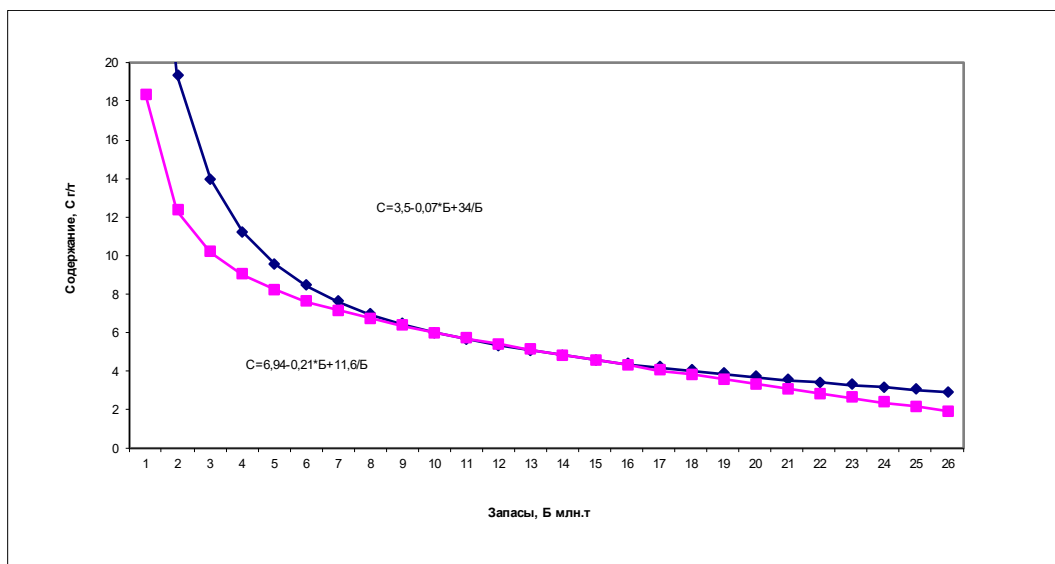


Рис. 2. Зависимость среднего содержания от количества отрабатываемых запасов месторождения.

Допустим, что в целях повышения содержания в первые годы эксплуатации сужен выемочный контур за счет оставления приконтурных запасов в объеме 15% от объема первоначальных.

Для компенсации сокращаемых запасов во второй половине срока эксплуатации в выемку включена законтурная прирезка в таком

объеме (несколько меньше 15%), чтобы среднее содержание в извлекаемых запасах осталось прежним, т.е. 6 г/т.

Рассчитаем среднее содержание $C(Б)$ в отрабатываемых запасах с учетом количества отрабатываемых запасов полезных ископаемых верхней части месторождения по известной формуле:

$$C(Б) = 3,5 - 0,7(1-0,15) + 3,2/(1-0,15) = 6,67 \text{ г/т}$$

Тогда содержание в теряемых приконтурных запасах будет равно:

$$C_{\text{ост}} = \frac{C - C_{\text{н}} \cdot 0,85}{0,15} = \frac{6 - 6,67 \cdot 0,85}{0,15} = 2,2 \text{ г/т.}$$

Аналогично определим содержание в извлекаемых $C_{\text{и.н.}}$ и прирезаемых $C_{\text{п}}$ запасах нижней части месторождения, отрабатываемой во второй половине срока эксплуатации.

$$C_{\text{и.н.}} = 3,5 - 0,7 \times 1,15 + 3,2/1,15 = 5,48 \text{ г/т};$$

$$C_{\text{п}} = (5,48 \times 1,15 - 6)/0,15 = 2 \text{ г/т.}$$

Таким образом, содержание в граничных запасах будет плавно снижаться по годам эксплуатации от 2,2 до 2 г/т, оставаясь в среднем на уровне оптимального бортового – 2,1 г/т.

Уточним необходимое количество прирезаемых законтурных запасов $q_{\text{п}}$ для сохранения среднего содержания в запасах $C = 6$ г/т.

$$6(1 - 0,15 \times 0,5 + q_{\text{п}}) = 6,1 - 0,5 \times 2,2 \times 0,15 + 2 q_{\text{п}}, \text{ Отсюда}$$

$$q_{\text{п}} = \frac{(6 - 2,2) \cdot 0,075}{6 - 2} = 0,07125$$

Следовательно, общее количество извлекаемых запасов при снижающихся кондициях составляет: $1 - 0,075 + 0,07125 = 0,99625$ или (99,6%) от первоначальных или 9962,500 т руды.

Благодаря дифференциации кондиций возрастает содержание и в первоначально отрабатываемых богатых запасах $C_{\text{н}}$. Оно составит (при исходном содержании на богатом участке с средним содержанием полезного компонента 8 г/т): $C_{\text{н}}^* = (8 - 0,15 \times 2,2) / 0,85 = 9,02 \text{ г/т.}$

Для оценки целесообразности отработки со снижающимися годами условиями выполним динамическую оптимизационную оценку месторождения.

Для рудных месторождений предлагается метод целенаправленной системно-оптимизационной разработки рудных месторождений, теоретические основы которого изложены в работах [13,27-30,45] ключевая идея метода заключается в направленности на раскрытие благоприятных индивидуальных характеристик месторождения и полное использование его природно-экономического потенциала. Важным условием достижения данной цели является системная (с учетом прямых и обратных связей) оптимизация базовых параметров и решений, прежде всего на концептуальном уровне проектирования, когда решения еще не зафиксированы. Структурообразующей основной оптимизационной модели служат признанные в мировой практике критерии чистой текущей стоимости (NPV) и внутренней нормы прибыли (IRR).

Исследуем достаточно распространенный случай с линейным снижением содержания металла в добываемой руде по годам эксплуатации месторождения.

Качество извлекаемого металла из 1т ежегодно добываемой руды в этом случае можно выразить следующей формулой:

$$M_t = M_n - \Delta M (t - 0,5), \quad \text{где } M = \alpha \xi \quad (2)$$

где M_t - выход металла из 1т руды в t -м году переработки;

M_n - выход металла из 1т руды в начале отработки месторождения;

ΔM – среднегодовой темп уменьшения выхода металла;

α – содержание металла в перерабатываемой руде;

ξ – коэффициент извлечения металла при переработке.

Средний выход металла за первый год эксплуатации $\frac{1}{2}$ годового интервала меньше начального выхода. Поэтому в формуле (2) уменьшено на 0,5 года.

С учетом (2) дисконтированную прибыль при первоочередной отработке наиболее богатых запасов можно представить в виде модели:

$$NPV = \frac{1}{(1+E)^{T_c}} \sum_{t=1}^T \left[\frac{C[M_H - \Delta M(t-0,5)]}{(1+E)^t} - \frac{z \cdot A}{(1+E)^t} \right] - \sum_{t=1}^T \frac{K_t}{(1+E)^{t-1}}, \quad (3)$$

где z – эксплуатационные затраты;

K_t – годовые капитальные затраты;

C – цена 1т готовой продукции (металла);

E – норматив дисконтирования;

T_c – срок строительства предприятия, включая его освоения;

T – продолжительность отработки запасов, включая продолжительность строительства и эксплуатации месторождения;

A – годовая производительность предприятия по руде.

Для удобства анализа представим двумерную оптимизационную модель в следующем виде:

$$R(A) = D_{од}(A) - \Delta D_d(A) - S_d(A) - K_d(A) =$$

$$C A M_0 \alpha_1 \beta_2 - C A \Delta M(A) \alpha_1 \gamma_2 - z(A) \alpha_1 \beta_2 - K(A) T_c^{-1} \beta_1,$$

$$\text{где } \alpha_1 = (1+E)^{-T_c}, \quad \alpha_2 = (1+E)^{-T}, \quad \beta_1 = \frac{(1+E)^{T_c} - 1}{E(1+E)^{T_c}}, \quad \beta_2 = \frac{(1+E)^T - 1}{E(1+E)^T}$$

$$\Psi = 1+E; \quad \gamma_2 = \gamma_1 + 0,5\beta_2, \quad \gamma_1 = [(\alpha_2^{-1} - 1) \cdot \Psi - T \cdot E] \cdot E^{-2} \cdot \alpha_2,$$

$$\Delta M(A) = \frac{2}{T} (M_0 - M), \quad M_0 = C_n K_k \xi; \quad T = B/A, \quad T_c = T_1 + T_2 A,$$

$$K = K_1 + K_2 A, \quad z = z_1 + z_2 A, \quad M = C K_k \xi.$$

Выполним расчеты при новых условиях (таблица 1).

Оценим вариант без компенсации оставляемой на первом этапе руды, т.е. без прирезки законтурных запасов.

Таблица 1.

Расчет чистой дисконтированной прибыли при опережающей
отработке богатых запасов со снижающимися кондициями

Показатели	Производственная мощность А, млн.т./год			
	0,5	1,0	1,5	2,0
Запасы Б, млн.т.	9,9625	9,9625	9,9625	9,9625
Срок отработки Т, лет	19,925	9,9625	6,6417	4,9812
Среднее содерж. С, г/т	6,0	6,0	6,0	6,0
Нач-ное содерж. С ₀ , г/т	9,02	9,02	9,02	9,02
Срок строит. Т _с , лет	2,35	2,80	3,25	3,70
Кэфф. β_1	2,0	2,337	2,65	2,966
Кэфф. α_1	0,8001	0,7663	0,7342	0,7035
Капит. влож. К, млн.д.	76,5	114	151,5	189
При- вед.капвлож.К _д ,млн.д.	65,1	95,5	124,0	151,5
Экспл.затр.З, млн.д./год	13	20	27	34
Коэффициент β_2	8,503	6,286	4,6842	3,7793
При- вед.экспл.затр.С _д ,млн.д	88,44	93,3	92,86	90,40
Коэффициент α_2	0,1497	0,869	0,5315	0,0,6221
Коэффициент α_2^{-1}	6,680	2,5846	1,8815	1,6075
Коэффициент γ_1	63,105	28,894	16,236	10,584
Коэффициент γ_2	59,453	25,830	13,394	8,694
Вых.мет.в начале М ₀ , г/т	7,216	7,216	7,216	7,216
Средн.вых.мет. М, г/т	4,8	4,8	4,8	4,8
Приращ.металл ΔM , г/т	0,2397	0,4794	0,7190	0,9587
Прир.диск.дох. ΔD_d , млн.д.	53,447	88,950	103,24	109,94
Диск.дох.в нач отр.Д _{од}	230,12	317,71	348,95	359,73
Диск.дох. Д _д , млн.долл.	176,67	228,75	245,75	249,79
Сумма д.затрат Z _д , млн.д.	153,54	189,08	216,86	241,90
Чист.диск.приб. R, млн.д.	23,13	39,67	28,5	7,89

При этом варианте извлекаемые запасы уменьшаются до 1-0,075=0,925 от первоначальных отработываемых руд и составят 9,25 млн. т.

Одновременно возрастает и среднее содержание в извлекаемых запасах месторождения $C=(6-0,075 \times 2,2)/0,925=6,308$ г/т.

Начальное содержание оставим прежним $C_n=9,02$ г/т. Произведем оптимизационную оценку этой схемы. Результаты оптимизации сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Расчет чистой дисконтированной прибыли при односторонней дифференциации кондиций без компенсации оставляемых приконтурных запасов

Показатели	Годовая производительность А, млн. т /год			
	0,5	1,0	1,5	2,0
Запасы Б, млн.т.	9,25	9,25	9,25	9,25
Срок отработки Т, лет	18,5	9,25	6,167	4,625
Среднее содержание С, г/т	6,308	6,308	6,308	6,308
Начальное содержание C_n , г/т	9,02	9,02	9,02	9,02
Срок строительства T_c , лет	2,35	2,80	3,25	3,70
Коэффициент β_1	2,0	2,337	2,658	2,966
Коэффициент α_1	0,8001	0,7663	0,7342	0,7035
Капитальные влож. К, млн.д.	76,5	114	151,5	189
Диск. кап. вложен. K_d , млн.д.	65,1	95,15	123,91	151,5
Эксплуат. затраты З, млн.д/г.	13	20	27	34
Коэффициент β_2	8,283	5,855	4,441	3,558
Диск. затраты S_d , млн.долл.	86,154	89,734	88,036	85,104
Коэффициент α_2	0,1716	0,4145	0,5559	0,6442
Коэффициент α_2^{-1}	5,8275	2,413	1,799	1,552
Коэффициент γ_1	59,378	26,081	14,576	9,322
Коэффициент γ_2	55,136	23,154	12,355	7,543
Нач. вых. металла M_0 , г/т	7,216	7,216	7,216	7,216
Средн. выход металла М, г/т	5,046	5,046	5,046	5,046
Прирост. металла ΔM , г/т	0,2346	0,4691	0,7026	0,9382
Диск. прир.доход ΔD_d , млн.д.	48,152	78,03	89,625	93,348
Диск.доход от нач. $D_{од}$, млн.д.	224,166	330,524	330,868	338,663
Сумма диск. затрат Z_d , млн.д.	151,254	184,884	211,946	236,601
NPV, млн. долл.	24,40	40,61	29,30	8,71

Из таблицы видим, что при $A=1$ млн. т./год дисконтированная прибыль выросла против предшествующего варианта (табл.1), что говорит о преимуществе данной схемы. Этим расчетом мы фактически

подтвердили нецелесообразность отработки даже в последние годы забалансовых запасов (с содержанием ниже среднего бортового). В то время, следует отметить, что оставление на начальном этапе части самых бедных балансовых запасов ради повышения среднего содержания в добываемой руде экономически целесообразно.

Применение дифференцированных кондиций возможно при различных вариантах с сохранением среднего содержания в запасах (рассмотренный выше случай), сохранением количества обрабатываемых запасов руд или металла и без указанных ограничений. Выбор наилучшего варианта осуществляется путем оптимизации.

Следует отметить, что преимущество динамической оптимизации с опережающей отработкой богатых запасов здесь неоспорима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толобекова Б.Т. Экономическая оптимизация полноты извлечения разнокачественных запасов и использования инвестиций. В сб. Материалы Ш- научной конференции КР(С)У, 1996.
2. Толобекова Б.Т. Обоснование организационного порядка отработки разнокачественных запасов месторождений. Известия ВУЗов КГМИ. Бишкек, 2002
3. Толобекова Б.Т. Автореферат диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук на тему: «Горно-экономическая оценка нагорных рудных месторождений при их проектировании», Бишкек, 2007.