Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVIII, вып. 1, 1969 г.

О ГЛУБИНЕ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ СИСТЕМАМИ С ОТКРЫТЫМ ОЧИСТНЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

А. Б. Макеенков

Системы разработки с открытым очистным пространством обеспечивают интенсивную выемку, высокую производительность труда и относительно низкую себестоимость добычи руды. Однако при таких системах потери руды неуклонно растут с глубиной горных работ. Важно определить экономически допустимую величину потерь руды в недрах и, следовательно, предельную глубину разработки системами с открытым очистным пространством. Нами рассматривается вопрос применительно к условиям медно-никелевого месторождения Котсельваара.

Основное рудное тело месторождения представляет собой пластообразную залежь, невыдержанную по мощности и углу падения. Руда и породы устойчивые, однако в рудном теле повсеместно встречается слабый прослоек брекчиевых руд. Горные работы на месторождении к настоящему времени достигли глубины 200 *м*. Потери руды в среднем составляют 15%, достигая по отдельным блокам 30% и более. Дальнейшая отработка рудного тела по участкам с различными горно-геологическими условиями предусмотрена системами разработки, указанными в табл. 1.

В соответствии с долевым участием различных систем разработки подсчитано, что предполагаемые потери руды на глубине 300 *м* достигнут 30%.

Таблица 1

Системы разработки месторождения Котсельваара

Угол падения рудного тела, *град*	Мощность рудного тела, *м*	Системы разработки с открытым очистным пространством
До 35	1—5	Камерно-столбовая со сплошной отбойкой руды в камере
	Более 5	Камерно-столбовая с верхней подсечкой камеры
34—50	1—3	С магазинированием руды и двойным скреперованием
	3—5 и более	Камерная с доставкой руды силой взрыва
Более 50	1—3	С магазинированием руды
	Более 3	С отбойкой руды из подэтажных штреков

Ширина несущих целиков при всех системах разработки определялась по методу Турнера—Шевякова с уточнениями по формуле

$$\frac{k_H \gamma H k_\alpha S}{s} = \frac{\sigma_{сж} k_ф}{n}, \qquad (1)$$

где k_H — коэффициент разгрузки; γ — средний объемный вес пород налегающей толщи, $т/м^3$; H — глубина разработки, $м$; k_α — коэффициент, учитывающий изменение нагрузки на целики с изменением угла падения; S — площадь пород кровли, приходящаяся на целик, $м^2$; s — площадь поперечного сечения целика, $м^2$; $\sigma_{сж}$ — средний расчетный предел прочности целика на сжатие, $т/м^2$; $k_ф$ — коэффициент формы; n — коэффициент запаса прочности.

Применительно к рассматриваемым условиям, затраты по добыче руды составляют примерно треть от общих производственных затрат на получение конечной продукции, расчет экономически допустимой величины потерь необходимо вести по полному циклу добычи и переработки руды. При этом в основу расчета оптимальной величины потерь руды следует заложить равенство прибыли при отработке определенного количества руды различными системами разработки с раз-

ными показателями извлечения руды и ее себестоимости. При расчете как капиталовложений, так и экономии на эксплуатационных расходах необходимо учитывать фактор времени [Астахов, 1966].

В рекомендуемой ниже методике расчета приняты следующие обозначения:

Q — промышленный запас руды, млн. *т*;

T_1, T_2 — товарная рудная масса по 1-му и 2-му вариантам, млн. *т*;

α — содержание никеля в промышленных запасах, доли единицы;

A — годовая производительность рудника, млн. *т*;

C_1, C_2 — себестоимость добычи руды по 1-му и 2-му вариантам разработки с учетом затрат на геологоразведочные работы, *руб/т*;

k_1, k_2 — выход товарной рудной массы по вариантам разработки;

p_1, p_2 — эксплуатационные потери руды по вариантам разработки, доли единицы;

r_1, r_2 — разубоживание товарной рудной массы по сравниваемым вариантам, доли единицы;

$\varepsilon_к$ — извлечение никеля в концентрат;

β — содержание никеля в концентрате, доли единицы;

f — стоимость обогащения 1 *т* руды, руб.;

f_1 — стоимость металлургического передела 1 *т* концентрата на одном комбинате, руб.;

f_2 — то же, на другом комбинате (транспорт файнштейна, разделение и рафинирование, электролиз, кобальтовый цех, общезаводские расходы), руб.;

e — общее извлечение в товарный металл;

ε_1, ε_2 — извлечение руды по вариантам.

Для условий данного месторождения рассмотрим целесообразность перехода на разработку с обрушением покрывающих пород. Принимая во внимание, что

$$k_1 = \frac{1 - p_1}{1 - r_1}; \quad k_2 = \frac{1 - p_2}{1 - r_2}$$

и обозначая

$$1 - r_1 = R_1; \; 1 - r_2 = R_2,$$

для вычисления прямых производственных расходов по сравниваемым методам разработки используем выражения

$$U_1' = T_1 c_1 + T_1 f + \frac{T_1 \alpha R_1 \varepsilon_к}{\beta} f_1 + T_1 \alpha R_1 e f_2, \text{ млн. руб.},$$
$$U_2' = T_2 c_2 + T_2 f + \frac{T_2 \alpha R_1 \varepsilon_к}{\beta} f_1 + T_2 \alpha R_2 e f_2, \text{ млн. руб.} \quad (2)$$

При сроке службы рудника менее 15 лет экономический эффект от разницы себестоимости по вариантам, согласно А. С. Астахову [1966], вычисляется по формуле

$$\mathcal{Э}_t^{(\tau)} = (c_2 - c_1) A \left[t' + \gamma E \sum_{n=1}^{\tau-3} n + \gamma^2 E^2 \sum_{n=1}^{\tau-6} n(\tau - 5 - n)\right], \text{ млн. руб.}, \quad (3)$$

где t' — срок службы рудника по 1-му варианту, лет; τ — срок подсчета экономического эффекта, $\tau = 15$ лет; $\gamma = 0{,}33$ — часть полученного эффекта, направляемого в фонд накопления; $E = 0{,}15$ — коэффициент эффективности капитальных вложений.

Выражение (3) можно записать в виде

$$\mathcal{Э}_t^{(\tau)} = (c_2 - c_1) A (t' + \varphi), \text{ млн. руб.}, \quad (4)$$

где

$$\varphi = \gamma E \sum_{n=1}^{\tau-3} n + \gamma^2 E^2 \sum_{n=1}^{\tau-6} n (\tau - 5 - n). \quad (5)$$

В зависимости от потерь руды в недрах по 1-му варианту коэффициент φ можно выразить эмпирической формулой

$$\varphi = \frac{446 - P_1 \cdot 100}{100} = \frac{346 + \varepsilon_1 \cdot 100}{100}. \quad (6)$$

Тогда выражение (3) запишется в виде

$$\mathcal{Э}_t^{(\tau)} = (c_2 - c_1) A \left(\frac{Q}{A} k_1 + \frac{346 + \varepsilon_1 \cdot 100}{100}\right), \text{ млн. руб.} \quad (7)$$

Разница амортизационных отчислений по сравниваемым вариантам составит

$$a_1 - a_2 = \frac{K}{Q k_1} - \frac{K}{Q k_2} = \frac{K}{Q}\left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right),$$

где

$$a_1 = \frac{K}{t'A}; \quad a_2 = \frac{K}{t''A}.$$

Эффект от разницы годовых амортизационных отчислений будет равен [Астахов, 1966]

$$\Phi_t^{(\tau)} = \frac{KA}{Q}\left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right)\left(t' + E\sum_{n=1}^{\tau-3} n + E^2\gamma\sum_{n=1}^{\tau-6} n\right), \text{ млн. руб.} \quad (8)$$

Это выражение можно записать в виде

$$\Phi_t^{(\tau)} = \frac{KA}{Q}\left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right)(t' + \psi), \text{ млн. руб.,} \quad (9)$$

где

$$\psi = E\sum_{n=1}^{\tau-3} n + E^2\gamma\sum_{n=1}^{\tau-6} n.$$

Коэффициент ψ в зависимости от извлечения по 1-му варианту можно выразить эмпирической формулой

$$\psi = \frac{215 + \varepsilon_1 \cdot 100}{20}, \quad (10)$$

и выражение (8) примет вид

$$\Phi_t^{(\tau)} = \frac{KA}{Q}\left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right)\left[\frac{Q}{A}k_1 + \frac{215 + \varepsilon_1 \cdot 100}{20}\right], \text{ млн. руб.} \quad (11)$$

Здесь K — стоимость основных фондов, амортизируемых за период существования рудника, млн. руб.

При варианте разработки с бóльшими потерями в связи с меньшим сроком существования рудника необходим ввод дополнительных добывающих мощностей для равенства годовой производительности по сравниваемым вариантам (изменением себестоимости руды по дополнительно вводимой мощности можно пренебречь). Основываясь на прежнем опыте, примем срок строительства нового рудника 5 лет. Экономию за счет разницы капиталовложений по годам можно вычислить по формуле

$$G_t^{(\tau)} = g\left[1 + E(T-3) + E^2\gamma\sum_{n=1}^{T-6} n\right], \text{ млн. руб.,} \quad (12)$$

где $T=\tau-t$; t — год первоочередных капиталовложений; g — разница годовых капиталовложений по вариантам, млн. руб. Тогда общая экономия составит

$$G_0 = \sum G_t^{(\tau)}, \text{ млн. руб.} \qquad (13)$$

Условно приняв одинаковые по годам строительства капиталовложения, указанную экономию можно определить по эмпирической формуле

$$G_0 = \sum G_t^{(\tau)} = 0{,}82\, g_0 \frac{Q}{A}(k_2 - k_1), \text{ млн. руб.,} \qquad (14)$$

где g_0 — среднегодовые капиталовложения, млн. руб.

При переходе на разработку с обрушением покрывающих пород необходимо провести работы по погашению пустот вышележащих горизонтов и некоторую реконструкцию поверхностных сооружений. Затраты по переходу на обрушение на 1 *м* длины рудного тела составят b руб., затраты на реконструкцию поверхности — N руб. Тогда общие капитальные затраты будут равны $N+bL$, где L — длина рудного тела по простиранию. Экономический эффект от затрат указанных средств составит

$$G_{\text{обр}} = (N+bL)\left[1 + E(T-3) + E^2\gamma \sum_{n=1}^{T-6} n\right], \text{ млн. руб.} \qquad (15)$$

или за 15 последующих лет

$$G_{\text{обр}} = 3{,}15\ (N+bL), \text{ млн. руб.} \qquad (16)$$

В итоге эффективность сравниваемых вариантов с учетом фактора времени определится (варианта с бо́льшими потерями по отношению к варианту с меньшими), как

$$Э = Э_t^{(\tau)} + \Phi_t^{(\tau)} - G_0 + G_{\text{обр}} - Qk_1(c_2 - c_1), \text{ млн. руб.} \qquad (17)$$

Общие производственные затраты по вариантам с учетом нормативного коэффициента рентабельности составят

$$U_1 = U_1' - Э + 0{,}15\, M_1 t', \text{ млн. руб.;}$$

$$U_2 = U_2' + 0{,}15\, M_2 t^2, \text{ млн. руб.,} \qquad (18)$$

где M_1, M_2 — основные и среднегодовые оборотные средства по производственному циклу комбинатов соответственно одного и другого комбинатов.

Или

$$U_2 = U_2' + 0{,}15\frac{Q}{A}k_2 M_2, \text{ млн. руб.;} \qquad (19)$$

$$U_1 = U_1' - Э + 0{,}15 M_2 \frac{Q}{A}k_1 + 0{,}15\left(M_2 + g_0\frac{\frac{Q}{A}(k_2 - k_1) + 1}{2}\right) \times$$

$$\times \frac{Q}{A}(k_2 - k_1) = U_1' - Э + 0{,}15\frac{Q}{A} \times$$

$$\times \left\{M_2 k_2 + \frac{g_0(k_2 - k_1)}{2}\left[\frac{Q}{A}(k_2 - k_1) + 1\right]\right\}, \text{ млн. руб.}$$

При равноценности сравниваемых вариантов по показателю рентабельности разработки итоговая формула будет иметь вид

$$v_2 Q k_2 - U_2 = v_1 Q k_1 - U_1, \qquad (20)$$

где v_2, v_1 — извлекаемая ценность руды по вариантам разработки; $v_1 = k_{пр}\,\alpha\, e\, R_1 F$, $v_2 = k_{пр}\,\alpha\, e\, R_2 F$; $k_{пр}$ — коэффициент приведения к единому металлу (для полиметаллических месторождений); F — отпускная цена 1 $т$ товарного металла (основного).

После расшифровки выражения (20) получим

$$v_2 Q k_2 - U_2' - 0{,}15 M_2 \frac{Q}{A}k_2 =$$

$$= v_1 Q k_1 - U_1' + Э_t^{(т)} + Ф_t^{(т)} - G_0 + G_{обр} - Q k_1 (c_2 - c_1) -$$

$$- 0{,}15\frac{Q}{A}\left\{M_2 k_2 + \frac{g_0(k_2 - k_1)}{2}\left[\frac{Q}{A}(k_2 - k_1) + 1\right]\right\}. \qquad (21)$$

Подставляя в формулу (21) значения входящих величин, после некоторых преобразований получим выражение для

определения искомой величины экономически оправданного извлечения при первом варианте разработки

$$\varepsilon_1^3\frac{0{,}15\,Q^2g_0}{2A^2R_1^2}-\varepsilon_1^2\left[k_{\text{пр}}\alpha eFQ-\frac{Qf}{R_1}-\frac{Q\alpha\varepsilon_к f_1}{\beta}-Q\alpha ef_2+\right.$$
$$+A\,(c_2-c_1)\left(\frac{Q}{AR_1}+1\right)-\frac{KR_2}{R_1t_2}-5\,\frac{KAR_2}{Q\varepsilon_2}+0{,}9\,\frac{g_0Q}{AR_1}-$$
$$-\frac{Q}{R_1}c_2+\frac{0{,}15\,Q^2g_0\varepsilon_2}{A^2R_2R_1}\Big]+\varepsilon_1\left[k_{\text{пр}}\alpha eFQ\varepsilon_2-\frac{Q\varepsilon_2c_2}{R_2}-\frac{Q\varepsilon_2f}{R_2}-\right.$$
$$-\frac{Q\varepsilon_2f_1\alpha\varepsilon_к}{\beta}-Q\varepsilon_2\alpha ef_2-3{,}46\,(c_2-c_1)+\frac{215KAR_2}{20Q\varepsilon_2}-K-$$
$$-5\,\frac{KAR_1}{Q}+0{,}82\,\frac{g_0Q\varepsilon_2}{AR_2}-3{,}15\,(bL+N)+$$
$$\left.+\frac{0{,}15Q^2g_0\varepsilon_2^2}{2A^2R_2^2}+\frac{0{,}15\,Qg_0\varepsilon_2}{2AR_2}\right]-\frac{215KAR_1}{20Q}=0. \qquad (22)$$

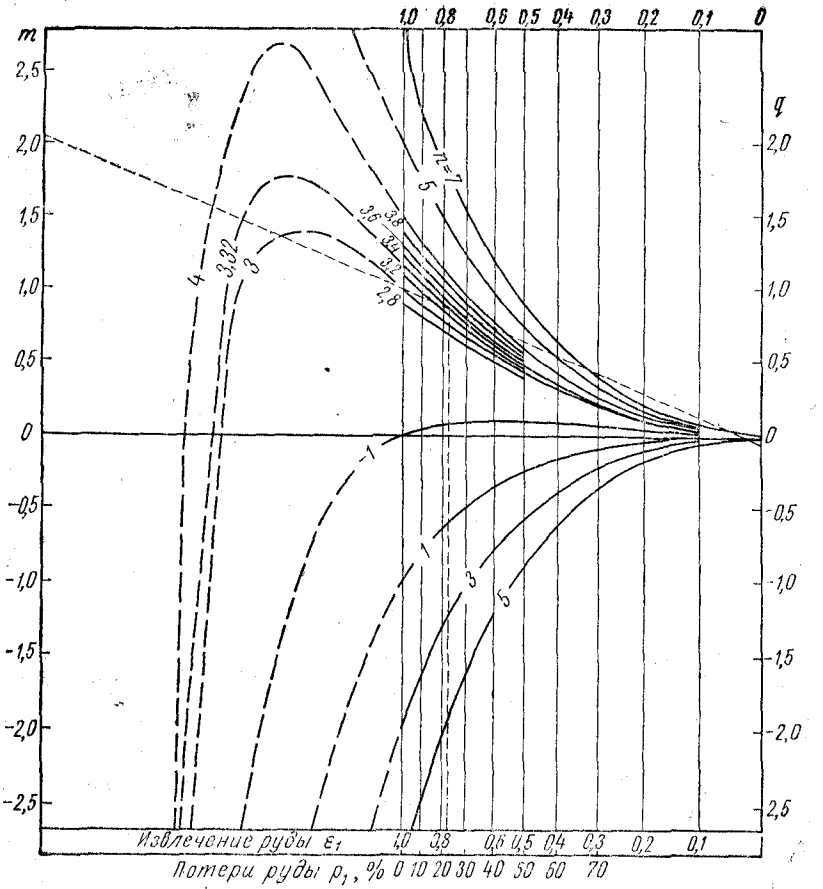
Выражение (22) представляет собой полное кубическое уравнение вида $\varepsilon_1{}^3-n\,\varepsilon_1{}^2+m\,\varepsilon_1-q=0$, один из положительных корней которого даст удовлетворяющее решение поставленной задачи. Решение полученного уравнения и его исследование рекомендуется вести при помощи номограммы.

Решением указанного уравнения при показателях сравниваемых систем, полученных в конкретных условиях разработки месторождения и переработки добытой руды, определяется значение средних потерь руды, которое показывает границу применения сравниваемых систем разработки.

Применительно к условиям разработки месторождения Котсельваара и переработки руды на комбинатах до конечного продукта при сравнении систем разработки с открытым очистным пространством и с обрушением налегающих пород получена экономически обоснованная величина средних потерь руды при разработке с открытым очистным пространством, равная 23,5%. По этой величине определена граница перехода на систему разработки с обрушением покрывающих пород для западного и восточного шахтных полей месторождения.

В общем случае для руд пологопадающих и наклонных месторождений средней мощности, характеризуемых коэффициентом формы $k_ф=x/h$, можно предложить следующую формулу для определения целесообразной глубины применения систем разработки с открытым очистным пространством

$$H=\frac{H_э\,(p-y)^2\sigma_{сж}}{\sin\alpha k_H\gamma k_\alpha nm}, \qquad (23)$$



Номограмма для определения оптимальной величины потерь руды по формуле

$$\varepsilon_1^3 - n\varepsilon_1^2 + m\varepsilon_1 - q = 0$$

$$q \to m \to n;\ n \to \varepsilon_1;\ \varepsilon_1 \to p_1$$

Пример: $q = 0{,}061$; $m = 2{,}04$, $n = 3{,}32$; $\varepsilon_1 = 0{,}765$; $p_1 = 23{,}5\%$

где $H_э$ — высота этажа, *м*; $\sigma_{сж}$ — предел прочности на сжатие для руд месторождения, *т/м²*; α — угол падения рудного тела, *град*; m — средняя мощность рудного тела, *м*; p — экономически допустимая величина потерь при системе разработки

с открытым очистным пространством, подсчитанная по формуле (22) или по монограмме, доли единицы; y — коэффициент, зависящий от угла падения, мощности рудного тела, параметров систем разработки и технологии ведения очистных работ.

Значение y рекомендуется принимать для условий месторождения Котсельваара в соответствии со следующими данными:

m, м	2	4	8	14
при α				
$<35°$	0,099	0,113	0,117	0,119
35—50°	0,091	0,108	0,083	0,065

Выводы

1. Уровень экономически допустимых потерь руды в недрах при определении области применения той или иной системы разработки следует рассчитывать исходя из полного цикла добычи и переработки руды и фактора времени.

2. Глубину целесообразного применения систем разработки с открытым очистным пространством для пологопадающих и наклонных месторождений с невыдержанными элементами залегания следует определять из сравнения величины прибыли при различных показателях извлечения руды и ее себестоимости по предлагаемой методике.

ЛИТЕРАТУРА

Астахов А. С. Оценка фактора времени и его учет в экономике горной промышленности. ИГД им. А. А. Скочинского, 1966.

Кудряшев П. И. Извлечение запасов и эффективность систем разработки. Горн. журн. № 5, 1967.

Сергеев А. А. Рациональное использование рудных месторождений. М., Недра, 1964.