

Т.Т. Исмаилов, А.В. Логачев, Б.С. Лузин, В.И. Голик

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Дана методика определения показателей эффективности технологии величине функции финансового итога. Охарактеризованы этапы оценки вариантов вовлечения в повторную переработку золотосодержащих отходов обогащения руд. Приведена экономико-математическая модель взаимосвязи входящих параметров. Даны модели определения экономического ущерба от хранения хвостов и эффективности утилизации хвостов. Приведены результаты анализа моделируемых технологических схем. Показано, что за счет увеличения объема некондиционного для традиционных технологий сырья можно обеспечить прибыль не только на втором этапе разработки, но и на третьем этапе при переработке хвостов обогащения.

Ключевые слова: золотосодержащие хвосты, извлечения металлов, выщелачивание, отвалы, экосистема.

Семинар 16

**T.T. Ismailov, A.V. Logachyov,
B.S. Luzin, V.I. Golik**
**SUBSTANTIATION OF GOLD
EXTRACTION EFFICIENCY FROM
ENRICHMENT TAILS**

It is given the technique of definition of efficiency indicators of technology size of a financial result function. Evaluation stages of variants of involving in repeated processing of gold-bearing ores enrichment waste are characterized. The economic-mathematical model of interconnection of entering parameters is resulted. Models of definition of an economic damage from tails storage and efficiency of their recycling are given. Results of the analysis of model-based technological schemes are resulted. It is shown that at the expense of increase in volume of sub-standard raw materials for traditional technologies it is possible to provide profit not only at the second development stage, but also at the third stage at processing of enrichment tails.

Key words: gold-bearing tails, metals extraction, leaching, dumps, ecosystem..

жении, что доход от продажи металла за вычетом эксплуатационных затрат на срок реализации варианта достаточен для того, чтобы окупить затраты на добычу и переработку золотосодержащих минералов.

Параметрами повторной переработки золотосодержащих хвостов обогащения руд являются объемы переработки минералов, содержание металла в руде, извлечение металла, цена на металл, капитальные и эксплуатационные затраты на строительство технологических объектов.

Показатели эффективности технологии определяются в результате поиска значения аргумента при заданной величине функции финансового итога (значения дисконта и время, обеспечивающие положительные результаты).

Показатель эффективности проекта:

$$\mathcal{E}_n = \sum_{i=1}^n \frac{u^i}{1+r}$$

где u^i – финансовый итог за время t ;
 r – процентная ставка (дисконт).

Финансовое благополучие предприятия по добыче золота из отходов базируется на поло-

Важным этапом определения финансового итога от реализации варианта развития производства является формирование финансовых итогов, равными для горнопромышленных проектов 1 году (рис. 1).

Надбавка за риск при коэффициенте $\beta = 1$ составляет 5 и 8 %. Фактическая норма в соответствии с требованиями рынка:

$$r = r_i + \beta \cdot (r_m - r_i),$$

где r – требуемая норма прибыли; r_i – свободная от риска норма прибыли; r_m – средняя рыночная премия.

Этапы оценки вариантов вовлечения в повторную переработку золото-содержащих отходов обогащения руд:

- определение годовых финансовых итогов от реализации процесса;
- расчет итога реализации варианта;
- выбор интервалов значений нормы прибыли в зависимости от варианта;
- вычисление сегодняшней ценности будущего финансового итога;
- анализ финансовой чувствительности варианта по отношению к изменению параметров финансового итога и значений дисконта.

Основное производство удешевляют товарные продукты, создаваемые в процессах извлечения металлов из отходов:

- металлы и неметаллы в виде солей и оксидов;
- вторичные хвосты выщелачивания с содержанием ингредиентов ниже ПДК, что позволяет использовать их в качестве сырья;
- обессоленная вода для систем отопления, охлаждения и др. целей с минерализацией не более 1 г/дм^3 , удовлетворяющая санитарным нормам;
- газообразные продукты: хлор, водород и кислород.

Товарные продукты используются или реализуются, улучшая экономику. Утилизации подлежат промежуточные продукты процесса: католит и анолит электрохимического процесса.

Католит с $pH=9-12,5$ и $Eh=800-900 \text{ мВ}$ - восстановитель, а анолит с $pH=1,5-2,0$ и $Eh=1100-1300 \text{ мВ}$ - окислитель. Область применения продуктов электрохимии, кроме горного производства, - кожевенное, строительное и др. производство, сельское хозяйство, теплоэнергетика и др. отрасли хозяйства.

Участок выщелачивания золота как самостоятельная динамическая система характеризуется комплексом изменяющихся во времени и пространстве природных, технологических и экономических факторов и технологическими связями геотехнологических процессов. Состояние системы формируется комплексами управляемых и неуправляемых параметров и подчиняется закону функционирования. Суммирующая характеристика производственной системы определяется решением экономико-математической модели, описывающей взаимосвязь входящих параметров. Комбинация параметров, обеспечивающая оптимум целевой функции, находится с помощью средств информационных технологий.

Основу модели составляет системный подход, заключающийся в отыскании оптимальных значений подсистем по критериям, общим для системы в целом. Модель отражает индивидуальность решаемой задачи и обеспечивает последовательное приближение к оптимуму оптимизацией каждого звена системы. Динамическая постановка задач линейного программирования с учетом стохастического характера изменения системы ограничивает дискретный интервал времени 10 годами с последующей корректировкой условий задачи. Увеличение количества переменных ограничивается с максимальной стороны точностью расчетов. При учете множества факторов линейная зависимость множественной корреляции:

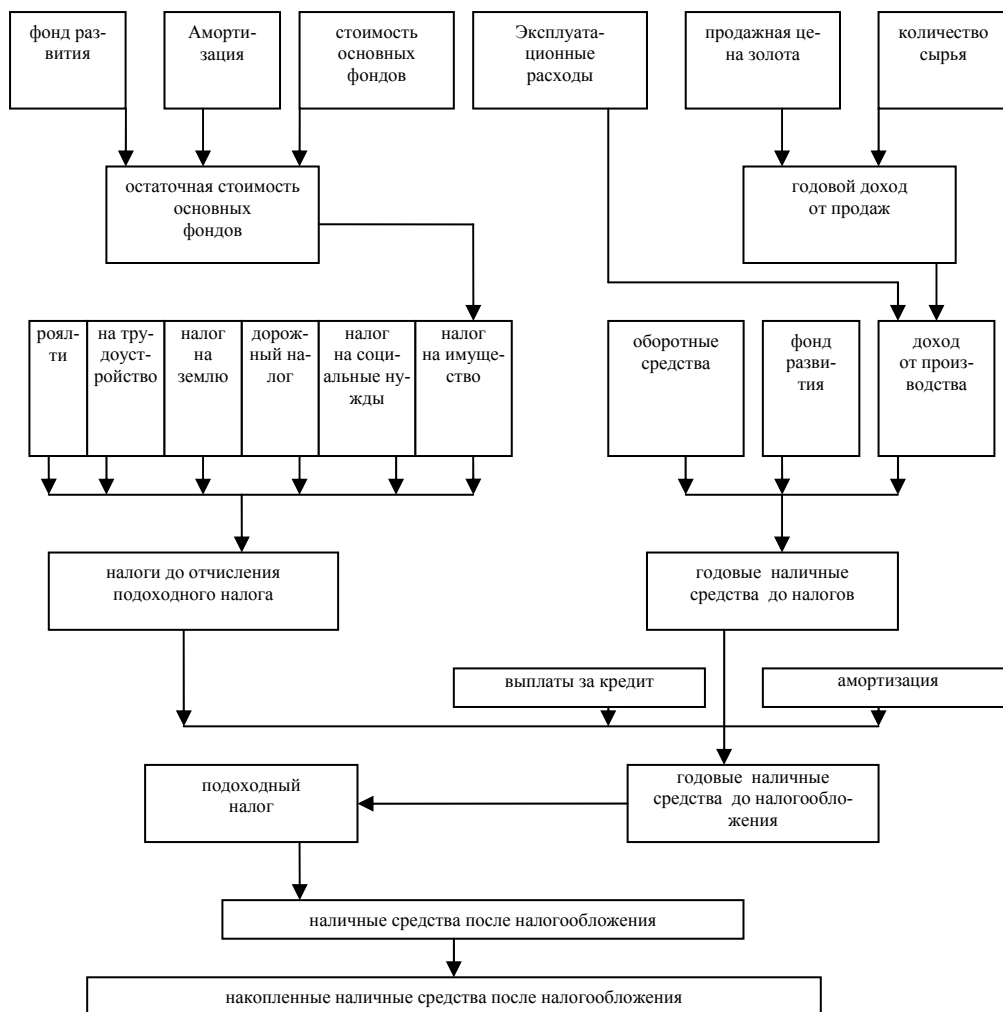


Рис. 2. Схема реализации вариантов развития производства

$C = a_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n$,
 где C - эксплуатационные расходы;
 b_1, b_2, \dots, b_n - коэффициенты, постоянные для данной продукции; a_0 - коэффициент неучтенных факторов.

Эксплуатационные расходы:

$C = a + bA + kM$,
 где A - объем растворов, циркулирующих в системе выщелачивания, м³/год; a - условно-постоянные расходы, не зависящие от объема переработки; b - коэффициент переменной части расходов, зависящий от изме-

нения объемов растворов; k - коэффициент переменной части расходов, зависящий от изменения количества золота; M - количество извлекаемого из растворов золота.

Хранение хвостов в отвалах включает в себя компенсацию экологического ущерба на рекультивацию земель и оплату штрафов. Штрафы не могут компенсировать ущерба экономического характера, потому что существующие методики определения величины ущерба ввиду наличия еще

не оцененных факторов производства нельзя считать корректными.

Переработка хвостов радикально улучшает состояние экосистемы. Поэтому затраты на строительство и эксплуатацию комплексов извлечения золота следует сопоставлять не только с ценностью полученного металла и дополнительных продуктов, но и со всей суммой отрицательных эффектов влияния отходов.

Обозначения в матрице: A - объем производства; n - неблагоприятные факторы; r - коэффициент риска; T - время; Y_{δ} - экологический ущерб при хранении хвостов; Y_n - экологический ущерб при переработке хвостов (рис. 2).

Математическая модель экономического ущерба от хранения хвостов переработки руд:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_y &= \mathcal{E}_+^x - \mathcal{E}_-^x, \\ \mathcal{E}_y &= \mathcal{Z}_{ox}t + \mathcal{Z}_{px}\beta + \mathcal{Z}_{шс}\beta + \mathcal{Z}_{гт}\beta = \\ &= \sum_1^l V_x (\dot{K}_x + \dot{K}_x) \alpha_M^x + \sum_1^n S \cdot \dot{K}_k t (1 + \beta) + \\ &+ \sum_1^n V_{\%} \alpha_M^c K_k (1 + \beta) + \sum_1^n V_r \gamma (1 + \beta) \end{aligned}$$

где $\mathcal{Z}_{ox} t$ - затраты на складирование хвостов в течение времени t ; \mathcal{Z}_{px} - плата за содержание хранилища; β - коэффициент соотношения фактических объемов с нормируемыми; $\mathcal{Z}_{шс}$ - затраты на компенсацию сброса не очищенных стоков в гидросферу; $\mathcal{Z}_{гт}$ - затраты на компенсацию сброса газопылевых продуктов в гидросферу; V_x - объем хвостов; t - время, год; \mathcal{Z}_o - удельные затраты на формирование хранилища; $\mathcal{Z}_п$ - удельные затраты на поддержание хранилища; α_M^x - остаточное содержание металлов в хвостах; n - количество источников выделения отходов; S - площадь, занятая хранилищем; $\mathcal{Z}_з$ - удельная стоимость земли; V_v - объем стоков; α_M^c - содержание металлов в стоках; K_k - коэффициент

$$\left\{ Y_{\delta} \right\} \left\{ \begin{array}{l} A \rightarrow \max \\ n \rightarrow \min \\ r, \rightarrow \min \\ T \rightarrow \min \end{array} \right\} \left\{ Y_n \right\},$$

Рис. 2. Матрица для определения эффективности процессов

кислотности (рН) жидких отходов; V_r - объем газо- и пылеобразных выбросов; γ - коэффициент концентрации твердого вещества в газообразной фазе.

Решение о целесообразности извлечения золота из хвостов принимается при комплексном учете технологических, экономических и экологических факторов: ценность полученных материалов, удешевление продукции, снижение затрат, увеличение конкурентоспособности, снижение риска, повышение ритмичности и стабильности производства и экономии:

$$\Delta \Pi = \Delta Q_{жс} \cdot \Pi_{жс} + \Delta Q_T \Pi_T + Q_c \Pi_c,$$

где $Q_{жс}$ - объем переработки жидких продуктов; Q_T - объем переработки твердых продуктов; Q_c - объем переработки газообразных продуктов; $\Pi_{жс}$ - ценность жидких продуктов; Π_T - ценность твердых продуктов; Π_c - ценность газообразных продуктов.

Изменение себестоимости основного продукта предприятия, в состав которого входит участок извлечения золота из хвостов:

$$\Delta_{\text{„-”}}^{\text{”-”}} = \overset{T}{\text{„-”}}^{\text{”-”}} - \overset{жс}{\text{„-”}}^{\text{”-”}}.$$

Экономический эффект снижения затрат:

$$\mathcal{E}_K = (\overset{T}{\text{„-”}}^{\text{”-”}}) A_0^M + (\overset{T}{\text{„-”}}^{\text{”-”}}) A_0^{\delta},$$

где $\overset{T}{\text{„-”}}^{\text{”-”}}$ и $\overset{жс}{\text{„-”}}^{\text{”-”}}$ - затраты традиционной и предлагаемой технологий; A_0^M - объем основного производства; A_0^{δ} - объем дополнительного производства.

Показателем эффективности извлечения золота является минимум приведенных затрат, который должен удовлетворять условию:

$$C_{min} = C_y^n + E_H K_y < \dots = f\left(\sum_1^n, \dots\right),$$

где C_y^n - себестоимость продукции из единицы переработанных отходов; Z - элементы загрязнения среды от 1 до n ; K_y - удельные капитальные вложения в модернизацию производства; $C_y^ш$ - штрафы за нарушение окружающей среды на единицу отходов.

Экономическая модель эффективности утилизации хвостов по критерию максимум прибыли с учетом экологии региона:

$$\Pi = \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N \left\{ (M_{cy} \Pi_{my} + Q_y \Pi_{qy}) \right\} -$$

$$- \sum_{z=1}^3 \left[K(1 + E_{ny}) + E_q + E_x \right] - \quad \text{гд}$$

$$- \left[(M_c \Pi_m + Q \Pi_q) + Q_r \Pi_r \right] \times$$

$$\times K_c K_y K_r K_o K_f K_{vp} K_q \rightarrow \max$$

e - продукты утилизации хвостов обогащения и бедных руд; O - виды вовлекаемых в переработку отходов; P - технологические процессы переработки отходов; T - время переработки отходов; F - фазы существования рудника и фабрики; N - стадия утилизации отходов; Z - затраты на переработку отходов; K - капитальные вложения для организации участка утилизации; K_c - коэффициент самоорганизации отвалов.

Экономический эффект получения продукции из хвостов обогащения:

$$\mathcal{E} = \sum_{t_0+1}^t \left(\frac{P \cdot \Pi - Z_a}{1,08^{t-t_0}} \right) \cdot A$$

где P - продукция получения от утилизации, вес ед.; Π - цена продукции, ден. ед.; Z_a - приведенные затраты на активацию, ден. ед./ед. веса; t_0, t - время начала и окончания работ; A - объем утилизации хвостов.

Экономический эффект, не учитываемый в денежном виде $\mathcal{E}_{нд}$:

$$\mathcal{E}_{нд} = \mathcal{E}_{з.к} + \mathcal{E}_{в.м} + \mathcal{E}_{с.ф.} + \dots + \mathcal{E}_n$$

где $\mathcal{E}_{з.к}$ - эффективность снижения затрат в зависимости от конъюнктуры; $\mathcal{E}_{в.м}$ - эффективность снижения затрат в зависимости от выпуска попутных материалов; $\mathcal{E}_{с.ф.}$ - эффективность снижения затрат в зависимости от социальных факторов.

Модель оптимизации затрат на утилизацию хвостов:

$$C = (C_1, C_2, \dots, C_n) \rightarrow \min$$

где C - конечная себестоимость утилизируемого продукта; C_1, C_2, \dots, C_n - себестоимость производственных процессов.

Область применения технологий переработки хвостов находят как совокупность значений, отвечающих приемлемому качеству продукции из утилизируемых отходов при доступных расходах энергии.

Эколого-экономическая эффективность горного производства характеризуется показателем эколого-экономической эффективности $K_{э.э.э.}$.

$$K_{э.э.э.} = \int_1^n f \cdot (dx_1, dx_2, \dots, dx_n) = Q_n : Q_y$$

где Q_n - объем извлеченных на поверхность золотосодержащих руд, m^3 ; Q_y - объем утилизированных минералов, m^3 ; x_1, x_2, \dots, x_n - параметры процессов переработки хвостов.

Прибыль от извлечения золота из хвостов обогащения и металлургии с учетом экологического ущерба определяется решением модели:

$$\Pi_x = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (C_{TO} - Z_{00} - Z_{0M}) \cdot Q_0}{t_0} +$$

$$+ \frac{\sum_{i=1}^{n_M} (C_{TM} - Z_{3M} - Z_{3MM}) \cdot Q_M}{t_M} + C_{ш}^M,$$

где P_x – прибыль от переработки хвостов, руб/т; $C_{T.O}$ – стоимость реализации продукции переработки хвостов, руб/т; Z_{oo} – затраты на обогатительный передел хвостов обогащения, руб/т; Z_{OM} – затраты на металлургический передел хвостов обогащения, руб/т; n_0 – количество извлекаемых компонентов из хвостов обогащения; Q_0 – масса хвостов обогащения, т; t_0 – время переработки хвостов обогащения, год; $C_{ш}^0$ – штрафы за хранение хвостов обогащения, руб/год; C_{TM} – реализация продуктов переработки хвостов металлургии, руб/т; Z_{OM} – затраты на обогащение хвостов металлургии, руб/т; Z_{MM} – затраты на металлургический передел хвостов металлургии, руб/т; n_{MM} – количество извлекаемых из хвостов металлургии компонентов; Q_M – масса хвостов металлургии, т; t_M – время переработки хвостов металлургии, лет; $C_{ш}^M$ – штрафы за хранение хвостов металлургии, руб/год.

Для иллюстрации экономической привлекательности заключительного этапа разработки месторождения приводится экономический анализ технологических схем. Сравнивается подземная выемка руд в 2 этапа: извлечение золота из богатых руд на фабрике и выщелачивание бедных руд в недрах (традиционный метод), и то же самое с добавлением этапа 3: выщелачивание золота из хвостов флотационного обогащения.

Инновационные методы выщелачивания здесь применяются в комплексе с традиционной технологией для более полного использования недр за счет вовлечения в эксплуатацию ранее потерянных руд.

Для установления экономически целесообразных границ применения инновационной технологии как альтернативной традиционным подземным способам добычи необходимо учитывать не только себестоимость подземных горных работ, но и общее извлечение металла. Это зависит от коэффициента сквозного извлечения металлов, содержания их в рудах и их стоимости.

Главный фактор экономической эффективности конверсионной технологии состоит в том, что при сравнимых затратах из недр извлекается гораздо большее количество металла за счет рентабельного освоения забалансовых запасов и отходов прежних этапов разработки месторождений.

Наибольший экономический эффект от внедрения управленческих нововведений и инновационных технологий в производственной сфере достигается прежде всего за счет лучшей координации решений вдоль технологических цепочек, что приводит к существенному улучшению использования запасов полезных ископаемых, активной конверсии производства, продлению жизненного цикла месторождений.

При моделировании результатов разработки месторождения на различных этапах существования по базовой и инновационной технологии рассмотрен случай, когда различными технологиями получается одинаковое количество товарной продукции. Значения величин, входящих в расчеты, приняты экспертно (таблица).

Стоимость основной продукции повышается за счет выпуска побочной продукции. Это позволяет за счет увеличения объема некондиционного для традиционных технологий сырья обеспечить прибыль не только на втором этапе разработки, но и на третьем этапе при переработке хвостов обогащения.

Сравнительные показатели поэтапной разработки

Показатели	Единицы измерения	Этапы		
		1-богатые руды	2-бедные руды	3- отходы и хвосты
Добыча руды горными работами	т. т/год	125	238	-
Переработано хвостов	т. т/год	-	-	1000
Содержание золота в сырье	г/т	5	3	1
Количество золота в сырье	кг	625	715	1000
Извлечение в концентрат	процент	80	70	50
Добыто золота в концентрате	кг	500	500	500
Цена 1г золота в концентрате	руб.	300	300	300
Стоимость концентратов	т руб.	150000	150000	150000
Объем выдаваемой горной массы	т м ³ /год	52	40	-
Образовано хвостов	т т/год	95	162	-
Стоимость побочных продуктов	т руб.	-	-	30000
Всего стоимость продуктов	т руб./год	150000	150000	180000
Эксплуатационные расходы	руб./т	1000	500	170
Расходы на добычу и обогащение	т руб.	125000	142000	170000
Прибыль на объем производства	т руб./год	25000	8000	10000
Прибыль на 1ед. добываемого сырья	руб/т	200	34	-
Прибыль на 1г товарной продукции	руб/г	40	18	20
Эффективность производства золота	процент	145	100	109

Прибыль будет еще больше, потому что в расчетах не учитываются выплаты за ухудшение окружающей среды при хранении отходов. Существующие методики не могут сделать это достоверно ввиду недостаточной изученности механизма влияния отходов на экосистемы.

Учитывая, что на этапе 1 разработки месторождений добывается не более 15-20 % запасов, а в ходе этапа 2 дорабатывается еще около 50% бедных руд, основные перспективы расширения объема производства могут быть обеспечены вовлечением в переработку забалансовых запасов, прежде всего техногенных запасов в виде хвостов обогащения.

Это позволяет освоить многочисленные хранилища хвостов с получением многопланового экономического, экологического и социального эффекта.

Влияние инновационных технологий на рост отдачи ресурсов протекает по направлениям: увеличение объемов добычи, обеспечивающих прирост продукции и повышение отдачи капитала, благодаря более эффективному использованию ресурсов, приросту запасов, содействует внедрению научно-технического прогресса и повышению производительности производства. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Исмаилов Т.Т. – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный горный университет, Moscow state mining university, Russia, ud@msmu.ru

Логачев А.В. – кандидат технических наук, доцент, Южно-Российский государственный технический университет, ngtu@novoch.ru

Голик В.И. – доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский горно-металлургический институт, v.i.golik@mail.ru

Лузин Б.С. – доктор экономических наук, Северо-Кавказский горно-металлургический институт, v.i.golik@mail.ru