

УДК 622.013

**Е.В. Шевченко, О.Г. Бурдзиева**

## **ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Предложен новый подход экономико-экологической оценки эффективности переработки хвостохранилищ Северо-Кавказского региона.*

*Ключевые слова: обогащение, отходы, эффективность, экология, экономика, переработка, хранение, затраты, утилизация.*

---

**Н**а Северо-Кавказских месторождениях, несмотря на радикальное уменьшение объема добычи с 1991 по настоящее время, в окрестностях хранилищ отходов обогащения содержится свинца, цинка, галлия, никеля, ртути, селена в почве возрастает. Например, в техногенных месторождениях Северной Осетии на территории около 250 га накоплено до 9 млн. тонн хвостов обогащения и металлургии, содержащих: ртуть – 110 т; свинец – 5390 т; сурьму – 52000 т; торий – 1,3 т; кобальт 150 т; металлы гальваники – 43 т; мышьяк – 50 т (таблица).

В теплой и влажной среде хранилищ хвостов при доступе кислорода развивается окисление, прежде всего, сульфидных материалов, причем, катализатором физико-химических процессов является углекислота хвостохранилищ.

Окисление хвостов является следствием сложных химических и бактериальных процессов. При нагревании горных пород выделяются газы, преимущественно  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  в количествах до  $30 \text{ м}^3/\text{т}$ . При растворении изменяются кристаллические решетки минералов и газы высвобож-

даются, усиливая окислительные процессы.

Инициатором природного выщелачивания является пирит, играющий роль катода. Действие электродных процессов проявляется на границах минералов с различными потенциалами. На эффективность процессов влияет скорость удаления газов, растворов, перемещения твердых остатков, т.е. раскрытия дополнительных рабочих плоскостей.

Отвальные воды выносят в окружающую среду продукты природного выщелачивания в виде соединений  $\text{Zn SO}_4$ ,  $\text{Cu SO}_4$ ,  $\text{Ca SO}_4$  и  $\text{Fe SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Во вторичных хвостах природного выщелачивания остаются  $\text{Zn CO}_3$ ,  $\text{Pb CO}_3$ ,  $\text{Cu CO}_3$ ,  $\text{Pb SO}_4$  и  $\text{Fe SO}_4$ . Последствия природного выщелачивания хвостов для окружающей среды зависят от соотношения этих групп.

С увеличением количества сульфидов и уменьшением карбонатов эффективность выщелачивания увеличивается. Для Садона это соотношение составляет около 6:1. Это значит, что при полном окислении в углекислоты соединения переходят до 20%, а 80% находится в сульфатной форме.

### Техногенные месторождения металлосодержащих хвостов

Месторождения	Характеристика		
	металл	содержание, %	запасы, т
Унальское хранилище хвостов обогащения 2 600 000 тонн на площади 61 га	свинец	0,21	5460
	цинк	0,32	8320
	медь	0,10	2600
	железо	6,2	161200
	титан	0,18	4680
	марганец	0,16	4160
	серебро	4,2 г/т	10,92
Фиагдонское хранилище хвостов обогащения 2 400 000 тонн на площади 56 га	свинец	0,19	4560
	цинк	0,35	8400
	медь	0,12	2880
	железо	6,8	163200
	титан	0,16	3840
	марганец	0,14	3360
	серебро	4,0 г/т	9,6
Хранилище хвостов металлургии завода «Электроцинк» 3 140 000 т на площади 30 га	свинец	0,6	18840
	цинк	0,8	34560
	медь	1,1	34540
	железо	20,6	646840
	титан	1,2	37680
	марганец	0,19	5966
	серебро	3,5	10,99

Это соотношение нарушается углекислотой, образуемой разложением в контуре хвостохранилища органических веществ азотными соединениями, которые образуются при выделении газов - продуктов взрывных работ (до 3 кг ВВ на 1 м<sup>3</sup> горной массы).

Основной признак эффективного выщелачивания - растворимость возникающих соединений, т.к. кроме перевода в раствор, важна еще и транспортабельность продуктивного раствора. При достаточном количестве пирита и кислорода природное выщелачивание хвостов протекает активно и, наоборот, при недостатке кислорода процесс замедляется. Расход теплоты повышается при наличии кальцита, который нейтрализует кислоты.

В технологии обогащения применяются цианиды и свободная кремниевая кислота. Тонко размолотая в процессе обогащения кварцевая составляющая загрязняет атмосферу.

В составе хвостов обогащения представлена и радиоактивная составляющая, которая растворяется интенсивнее, чем сульфиды свинца и цинка. Наличие урана и тория обусловлено генетически, т.к. из четырех стабильных изотопов свинца три являются конечными продуктами радиоактивных рядов урана 238, 235 и тория 233.

В процессе комплексного радиоактивно-химического воздействия на минералы происходит радиолитическая фаза «вода - руды - металлы», рождающий кислород в виде гидроксильных групп, гидроперемежных радикалов, перекиси водорода и т.п., угольную, азотную, серную и органическую кислоты и атомарный хлор, что интенсифицирует процесс выщелачивания.

Работа радиации заключается в разрушении минералов с раскрытием новых активных поверхностей для проникновения реагента. Руды с вы-

соким содержанием радиоактивных компонентов в течение почти 2 веков в промышленных масштабах добывали на Садонских месторождениях и перерабатывали, формируя значительную часть отвалов Садонского свинцово-цинкового комбината и завода «Электроцинк».

Инерционность опасности горно-промышленного производства для окружающей среды заключается в том, что после завершения работ по добыче руд и пород из хранилищ в окружающую среду из накопленных запасов еще длительное время будут поступать загрязняющие элементы.

С изменением физико-химической обстановки сульфиды, находящиеся в массиве природного месторождения в состоянии равновесия, приобретают потенциальную энергию и окисляются.

При увлажнении отвалов сульфаты частично растворяются, поддерживая уровень концентрации ионов в отвальных водах, поэтому изменение гидродинамического режима принципиально не изменяет минерализацию в системе.

Основной фактор поражающего воздействия хвостовых хранилищ - миграция металлов отвальными водами в окружающую среду.

Локальные нарушения системы биогеоценоза влекут за собой последствия для социо-природной системы, особенно, если это касается конфликта аграрной и промышленной сфер, так как растениеводство и животноводство, связаны с интенсивной эксплуатацией земельных ресурсов, а промышленные выбросы, сбросы и отходы производства загрязняют почвы, снижают их плодородие и приводят к деградации.

Выщелоченные природными процессами металлы: кадмий, цинк, свинец, мышьяк, ртуть и другие дегради-

руют почвы. Избыток металлов отрицательно влияет на почвенную биоту и угнетает растения. Существенную опасность для почв представляют радионуклиды - стронций ( $^{90}\text{Sr}$ ), кобальт ( $^{60}\text{Co}$ ), цинк ( $^{65}\text{Zn}$ ), цезий ( $^{137}\text{Cs}$ ), которые особенно интенсивно поступают в растения на бедных почвах.

Математическая модель механизма поражения окружающей среды продуктами природного выщелачивания хвостохранилищ увязывает процессы, происходящие в пределах отвалов, как заключительный этап реакции при отделении минералов от массива и транспортировке по технологической цепи, а также в биосфере после выноса растворов за пределы хвостохранилищ:

$$Y = f(M_c, M_r, Q, a, T) = \sum_{n=1}^n \sum_{p=1}^p \sum_{o=1}^o \sum_{t=1}^t [(Q_a + Q_n + Q_m) \cdot (a_r^x - a_k^x)] \times (\sum K_c \cdot K_y \cdot K_T \cdot \sum \cdot K_o \cdot K_r \cdot K_{ep} K_r) \rightarrow \max$$

где  $Y$  – факторы поражения окружающей среды продуктами природного выщелачивания;  $M_c$  – масса хвостов;  $M_r$  – масса природных реагентов;  $Q$  – объем производства;  $a$  – концентрация вещества;  $\Pi$  – количество предприятий по добыче и переработке минералов;  $P$  – количество компонентов в хвостах;  $O$  – операции технологической переработки;  $T$  – время переработки;  $Q_a, Q_n, Q_m$  – количество растворителей атмосферного, подземного и технологического происхождения, соответственно;  $a_r^x, a_k^x$  – исходная и конечная концентрация веществ в хвостах;  $K_c$  – коэффициент самоорганизации геохимического ландшафта;  $K_y$  – коэффициент утечки продуктов выщелачивания за пределы хвостохранилищ;  $K_T$  – коэффициент дальности утечки растворов;  $K_o$  – коэффициент влияния на биосферу;  $K_r$  – коэффициент глобально-

сти;  $K_{вр}$  – коэффициент реализации опасности со временем;  $K_r$  – коэффициент риска от неучтенных факторов.

Основное звено механизма загрязнения окружающей среды - извлечение загрязняющего элемента из хвостов в результате природных физико-химических, электрических и бактериальных процессов.

Ему может быть противопоставлено управляемое технологическое извлечение металлов из хвостов с получением доступных для неограниченной утилизации компонентов.

В качестве критерия целесообразности таких технологий используют: себестоимость продукции, прибыль, величину капитальных затрат и срок их окупаемости, рентабельность производства, чистый доход, приведенные затраты, национальный доход, дифференциальную горную ренту и др. показатели

Общий недостаток известных методик заключается в том, что они не учитывают экологические аспекты разрушения окружающей среды отходами. Отсутствие методик достоверного определения ущерба, наносимого некорректными или корректными с прежних позиций технологическими решениями, приводит к погрешностям в экономических расчетах.

Введение в практику расчета стоимости минерально-сырьевой продукции природоохранных затрат требует изменений в методическом подходе к выбору критерия и показателей эколого-экономической оценки минерально-сырьевого потенциала региона.

Экономико-экологическую оценку эффективности переработки хвостов региона, где уже имеется не задействованный в рыночном товарообмене вторичный минерально-сырьевой потенциал, нами предлагается опреде-

лять как сумму экологических, социальных и экономических эффектов.

Этот подход имеет преимущества, в том числе:

- учет эколого-экономической ситуации;
- расширение ассортимента выпускаемых товаров;
- комплексность горного производства;
- рационализация вариантов сочетания добычи и использования отходов;
- полнота использования природных ресурсов.

Предлагаемый критерий эффективности утилизации отходов представлен суммой прибыли или величинной условий прибыли при условии безотходности технологии или утилизации отходов. Введение этого критерия ставит предприятия в равные положения, так как затраты на утилизацию будут зависеть от их технологического потенциала - чем корректнее технология, тем меньше затраты на реабилитацию окружающей среды.

Эффективность утилизации хвостов обогащения и металлургии складывается из снижения величины экологического ущерба от хранения хвостов, стоимости полученных при переработке металлов, сырья для строительной индустрии и попутной товарной продукции.

Сумма прибыли или интегральный критерий эффективности:

$$\sum_{t=1}^{t_d+t_y} \Pi = \sum_{t=1}^{t_d} \Pi \frac{1}{1+E_{нд}} - \sum_{t=1}^{t_y} \Pi \cdot C_y (1+E_{ny}) > 0 \rightarrow \max$$

где  $t_d$ ,  $t_y$  - время на добычу металла и на утилизацию отходов;  $C_y$  - затраты на материалы, энергию, оборудование и оплату утилизации;  $E_{нд}$  - коэф-

фициент процентной ставки на кредит для добычи и обогащения;  $E_{ny}$  - коэффициент процентной ставки на кредит для утилизации.

При оценке влияния складирования материалов обычно учитывают только ощутимые аспекты: занятость земли под хвостохранилища, отвалы и т.п. Даже в неполном виде для условий, например, КМА этот ущерб достигает 50-75% от затрат на добычу. Фактический же ущерб больше, если учесть ущерб окружающей среде не только во время добычи, но и спустя неопределенно долгое время впоследствии. Например, природное выщелачивание металлов на разведенных, но консервированных или же временно остановленных месторождениях обедняет запасы и загрязняет земли, водные источники, атмосферу и т.д.

При эксплуатации рудника и обогатительной фабрики от утилизации хвостов возможно получение товарной продукции, поэтому:

$$Y_{\text{экс.}} = \sum_{t=1}^t \sum_{n=1}^n \sum_{k=1}^k (M_e \Pi_m - M_{ey} \Pi_{my}) + \sum_{t=1}^t \sum_{r=1}^r \sum_{f=1}^f (Q \Pi_q - Q_y \Pi_{qy}) \rightarrow \max$$

где  $M_{ey}$  - количество металлов, полученных при активации и утилизации хвостов обогащения и отходов;  $\Pi_{my}$  - цена утилизированных металлов;  $Q_y$  - восстановленные в результате утилизации полезные эффекты;  $Q$  - количество потерянных при нарушении экологии полезных эффектов;  $\Pi_q$  - стоимость потерянных эффектов и качества;  $\Pi_{qy}$  - цена утилизированных веществ: строительных материалов, восстановленного плодородия, продуктов и т.п.

При ликвидации предприятий без утилизации хвостов и отвалов, а только с рекультивацией земель, опасность окружающей среде не уменьшается, а возрастает за счет проявления новых, неизученных и непрогнозируемых глобальных факторов, отли-

чающихся от региональных. Опасность увеличивается тем обстоятельством, что доступ к опасным отходам прекращается.

Ущерб окружающей среде от рекультивированных без утилизации хвостохранилищ:

$$Y_{p,x} = \sum_{t=1}^t \left( \sum_{n=1}^n \sum_{k=1}^k M_e \Pi_m + \sum_{r=1}^r \sum_{f=1}^f Q \Pi_q + \sum_{q=1}^q Q_r \Pi_r \right) \rightarrow \max$$

где  $q$  - число факторов глобального воздействия хвостов и отходов;  $Q_r$  - количество глобальных эффектов поражения окружающей среды;  $\Pi_r$  - цена компенсации факторов поражения среды.

Математическая эколого-экономическая модель эффективности утилизации хвостов по критерию прибыли с учетом экологии региона имеет вид:

$$\Pi = \sum_{p=1}^p \sum_{o=1}^o \sum_{n=1}^n \sum_{t=1}^t \sum_{f=1}^f \sum_{n=1}^n \{ (M_{ey} \Pi_{my} + Q_y \Pi_{qy}) \} - \sum_{z=1}^3 [ K (1 + E_{ny}) + E_q + E_x ] - [ (M_e \Pi_m + Q \Pi_q) + Q_r \Pi_r ] \times K_c K_y K_r K_6 K_f K_{bp} K_q \rightarrow \max$$

где  $P$  - продукты утилизации;  $O$  - виды отходов, вовлекаемые в переработку;

$\Pi$  - технологические процессы переработки отходов;  $T$  - время переработки отходов;  $F$  - фазы существования рудника и фабрики;  $N$  - стадия утилизации отходов;  $Z$  - затраты на утилизацию отходов;  $K$  - капитальные вложения для организации участка утилизации;  $K_c$  - коэффициент самоорганизации отвалов.

Экономический эффект получения продукции из хвостов обогащения:

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

где  $P$  - продукция получения от утилизации, вес ед.;  $\Pi$  - цена продукции, ден. ед.;  $Z_a$  - приведенные затраты на активацию, ден. ед./ед. веса;  $t_0$  и  $t$  -

время начала и окончания работ; А - объем утилизации хвостов.

Экономический эффект, не учитываемый в денежном виде:

$$\mathcal{E}_{н.д} = \mathcal{E}_{з.к} + \mathcal{E}_{в.м} + \mathcal{E}_{с.п} + \mathcal{E}_{у.о} + \mathcal{E}_{г.д}$$

где  $\mathcal{E}_{з.к}$ ,  $\mathcal{E}_{в.м}$ ,  $\mathcal{E}_{с.п}$ ,  $\mathcal{E}_{у.о}$ ,  $\mathcal{E}_{г.д}$  - соответственно, эффективность снижения затрат в зависимости от конъюнктуры материалов, производства попутных материалов, занятости населения и т.п.

Годовая прибыль от переработки хвостов обогащения и металлургии с учетом экологического ущерба:

$$\Pi_x = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (C_{т.о} - Z_{о.о} - Z_{о.м}) \cdot Q_0}{t_0} + C_{ш}^o + \frac{\sum_{i=1}^{n_m} (C_{т.м} - Z_{о.м} - Z_{м.м}) \cdot Q_m}{t_m} + C_{ш}^m$$

где  $\Pi_x$  - годовая прибыль от переработки хвостов, руб./т;  $C_{т.о}$  - стоимость реализации продукции переработки хвостов, руб./т;  $Z_{о.о}$  - затраты на обогащение хвостов обогащения, руб./т;  $Z_{о.м}$  - 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;  $C_{ш}^o$  - штрафы за хранение хвостов обогащения, руб./год;  $C_{т.м}$  - реализация продуктов переработки хвостов металлургии, руб./т;  $Z_{о.м}$  - затраты на обогащение хвостов металлургии, руб./т;  $Z_{м.м}$  - затраты на металлургический передел хвостов металлургии, руб./т;  $n_m$  - 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.

Методика анализа воздействий хвостохранилищ, основанная на принципе последовательных приближений, позволяет сократить затраты на мониторинг взаимодействия объекта с окружающей средой и повысить его эффективность.

Интенсивность опасного для окружающей среды природного выщелачивания хвостов определяется характером и временем контакта твердой и жидкой сред, соотношением количества сульфидов и карбонатов, количества углекислоты и пирротина.

При рекультивации хвостохранилищ без утилизации хвостов опасность окружающей среде возрастает за счет проявления новых, неизученных и непрогнозируемых факторов и тем, что загрязняющие элементы будут поступать в окружающую среду еще длительное время.

Критерий эффективности технологий утилизации хвостов - прибыль при условии безотходности технологии или утилизации отходов ставит предприятия в равные положения, так как затраты на утилизацию будут зависеть от корректности технологий, определяющих величину затрат на реабилитацию окружающей среды.

Эффективность технологий утилизации хвостов обогащения и металлургии складывается из снижения величины экологического ущерба от хранения хвостов, стоимости полученных при переработке металлов, сырья для строительной индустрии и попутной товарной продукции, а область применения находят как совокупность значений, отвечающих приемлемому качеству изделий утилизируемых отходов при экономически доступных расходах энергии.

### Коротко об авторах

Шевченко Е.В. - Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, канд.эконом. наук, Шахты.

Бурдзиева О.Г. - Центр геофизических исследований РАН, аспирант, [zaal@mail.ru](mailto:zaal@mail.ru).