

УДК 622.013

**О.Г. Бурдзиева, Е.В. Шевченко**

## **ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ХРАНЕНИЯ ОТХОДОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Проведен анализ влияния отходов горного производства на окружающую среду, определены направления утилизации хвостохранилищ.*

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

---

**В** связи с растущим антропогенным воздействием охрана окружающей среды давно превратилась в глобальную проблему. Это обусловлено демографическим взрывом, ускоряющейся урбанизацией, развитием горных разработок, загрязнением окружающей среды отходами, чрезмерной нагрузкой на земли и т.п.

Вклад в загрязнение окружающей среды вносит и горнодобывающая промышленность, доля которой в загрязнении среды достигает 20 % от общего количества.

В условиях гористого рельефа проблема еще более обостряется из-за ограниченности и замкнутости пространства. Обеспечение безопасной деятельности горных предприятий в условиях высокогорья, в зоне близкого расположения снегов является сложной научной и технической задачей. Факторы, влияющие на состояние окружающей среды, в условиях высокогорья носят приоритетный характер из-за особых признаков ландшафтного, территориального и географического плана.

При добыче руд загрязнение и разрушение окружающей среды достигает значительных масштабов, а в условиях высокогорных месторожде-

ний Северного Кавказа (Садонское, Тырныаузское, Урупское), проблема обостряется расчлененностью высокогорного рельефа и естественной изоляцией.

При разработке металлических месторождений содержание извлекаемых металлов не превышает первые проценты, поэтому добыча металла сопровождается выходом до 99% отходов.

Из многочисленных месторождений Северного Кавказа с 1968 г. разрабатываются месторождения меди Урупской группы (Ставропольский край). В Садонском рудном районе (Северная Осетия) свинец начали добывать уже 180 лет назад. Полвека добываются вольфрам и молибден из руд Тырныаузского месторождения (Кабардино-Балкария), более 30 лет добывались радиоактивные руды месторождения Быкогорское.

Практически на всех месторождениях применяли технологии с открытым выработанным пространством или с обрушением. Объекты добычи и переработки руд связаны между собой и сборной артерией – р. Ардоном.

Неиспользуемые и складированные на поверхности геоматериалы подвергаются активному природному выщелачиванию атмосферными осад-

ками с извлечением в раствор более 20 только учитываемых ингредиентов, в т.ч. тяжелых металлов. Происходит деградация садовых культур, например, в с. Дзинцар на реке Ардон (Осетия) и с. Былым на реке Баксан (Кабардино-Балкария), расположенных рядом с хвостохранилищами обогатительных фабрик.

Рост объемов добычи и снижение содержания металлов в рудах - основные закономерности развития сырьевой базы горной промышленности. Складирование и хранение хвостов требует затрат, изъятия из оборота сельскохозяйственных угодий, загрязняет атмосферу, поверхностные и подземные воды. В то же время хвосты содержат значительное количество металлов и редких элементов, извлечение которых традиционными методами пока еще экономически не рентабельно.

В процессе обогащения руд образуются хвосты, которые транспортируются и укладываются в хранилища.

Хвосты представляют собой измельченную горную массу, по гранулометрическому составу близкую к мелкозернистым пылеватым пескам. В сухом состоянии они раздуваются ветром, образуя облака пыли, создавая крайне неблагоприятные условия для экосистем. Разносу горной массы и образованию песчаных бурь способствуют дующие в течение 2-3 дней ветры, скорости которых достигают 25-28 м/с.

Хвосты обогащения и металлургии - сырье с низким содержанием полезных компонентов и высоким содержанием примесей, избыточно измельченное, окисленное и труднообогащаемое.

Академик В.А. Чантурия отмечает, что техногенное месторождение - хвостохранилище - необходимо формировать при соблюдении условий

минимального гидрогеологического взаимодействия с окружающими геологическими структурами. По истечении срока эксплуатации должны быть приняты меры к его рекультивации и возвращению земли в пользование.

Техногенное минеральное сырье не может эффективно перерабатываться с помощью традиционных технологий из-за существенного изменения физических и физико-химических свойств составляющих компонентов вследствие окисления, выщелачивания и вторичного осаждения при хранении.

Выщелачивание токсичных элементов из хвостов продолжается 100-150 лет, окисление пирита с генерацией свободной серной кислоты, стимулирующей выщелачивание - 200 лет. Окисление сульфидных минералов в лежалых хвостах происходит в тонком слое от 5 до 80 мм, далее на поверхности присутствуют адсорбированные продукты окисления - гидроксиды металлов и осажденные коллоидные частицы гидроксидов металлов, образующие слой толщиной 1-5 мкм и тонкие минеральные частицы микронных размеров.

С ростом добычи полезных ископаемых в 20 веке количество отходов стало расти быстрее, чем выход продукции, т.к. одновременно уменьшалось содержание полезных компонентов в рудах, увеличивалась зольность углей, усложнялись условия разработки месторождений и увеличивался выход отвальных и вскрышных пород. Общее количество добываемого в мире минерального сырья оценивается приблизительно в 100 млрд т в год и растет с периодом удвоения в 10-12 лет.

Проблема отходов горного производства рассматривается в различных аспектах. С экологической точки зрения наибольшую тревогу вызывают

отвалы отходов. Под породные отвалы отводится примерно 0,1 га площади земли на каждые 1000 т сырья, и они занимают сотни млн. гектаров, чаще всего неудобной, а в ряде случаев вполне плодородной земли. Природа уже не справляется с возрастающим количеством отходов горного производства, что приводит к необратимому загрязнению экосистем среды обитания. На всех стадиях существования отходов они влияют на окружающую среду, если не утилизируются.

Происходящие в отвалах физико-химические процессы, нарушая природный минерально-химический баланс, оказывают влияние на количество углекислого газа, разрушают озоновый слой с активизацией солнечной радиации; активизируют температурную инверсию и т.п.

Научные и технологические исследования по вовлечению в переработку бедного окисленного сырья техногенных месторождений, а также сырья с измененными физико-химическими свойствами связаны с созданием новых нетрадиционных технологий с использованием комбинации обогатительных и гидрометаллургических приемов.

При переработке лежалых хвостов обогащения основные трудности связаны с окислением рудных минералов и значительной долей тонкодисперсных частиц шламов. Высокое содержание тонких фракций в хвостах, необходимость измельчения для раскрытия сростков вызывают существенные трудности при последующем обогащении ввиду низкой эффективности флотационного метода для разделения тонких частиц.

В результате глубокого окисления сульфидных минералов их поверхность в щелочной среде покрывается гидрофильными гидроксидами метал-

лов, а единственное гидрофобное вещество, которое может образоваться в процессе окисления – элементарная сера, окисляется до сульфидных ионов и переходит в раствор.

При переработке хвостов обогащения основные трудности связаны с окислением рудных минералов и значительной долей тонкодисперсных частиц шламов. Высокое содержание тонких фракций в хвостах, необходимость измельчения для раскрытия сростков вызывают существенные трудности при последующем обогащении ввиду низкой эффективности флотационного метода для разделения тонких частиц.

Реки являются коллекторами техногенных ингредиентов, распределяя их не только в пределах горных территорий, но и равнинных территорий. Так, река Ардон на участке Садонского месторождения получает около 3 млн. м<sup>3</sup>/год стоков, в которых растворено 700 мг/дм<sup>3</sup> или около 2000 т минеральных веществ. В том числе 11 т при 383 ПДК (предельно допустимой концентрации) цинка, 1,2 т при 37 ПДК меди, 80 т при 355 ПДК нитратов, 2 т при 14 ПДК свинца. Хвосты складываются на участках уширения ущелий рядом с горными реками и вымываются водными потоками.

С позиций охраны среды и использования производственных фондов на действующих предприятиях, особенно на предприятиях, добывающих балансовые запасы и имеющих резервные мощности, важнейшим направлением считают вовлечение в эксплуатацию отвалов и хвостохранилищ твердых отходов горного цикла.

Уменьшение объема мелкой фракции хвостов обогатительной фабрики может быть преодолено путем применения сортировки (обогащения в тяже-

лых суспензиях, фотонейронного метода и т.д.). Эти геоматериалы пригодны для целей строительства в виде камня, щебня, песка и т.д. Наиболее измельченные фракции отходов могут быть в качестве закладочного материала направлены в выработанное пространство. Для повышения прочности закладки практикуется добавка крупной фракции отсортированной породы.

Так, в республике Северная Осетия - Алания накоплено 7,5 млн. т промышленных отходов 1-4 классов опасности, из которых 7,2 млн т - это отходы заводов "Электроцинк", "Победит", Унальского и Фиагдонского хвостохранилищ Мизурской и Фиагдонской обогатительных фабрик на территории около 250 га земель.

Наиболее известен в этом отношении один из старейших рудников России - Садонский, эксплуатирующий более 160 лет полиметаллическое месторождение, первое упоминание о котором относятся к IV в. до н. э.

Промышленная эксплуатация как свинцово-серебряного месторождения начата в 1863 г. Работы велись с ручной разработкой руды и оставлением в пустотах отходов сортировки. К концу прошлого столетия свинцовые руды верхних частей месторождения были отработаны, а в пустотах накоплены цинковые руды, потому что цинк из них еще не извлекали.

В экологическом состоянии региона существенную роль играет хвостохранилище, слив которого попадает в р. Ардон. Ложем его являются галечники р. Ардон. Правый борт отделен от русла реки бетонной дамбой, укрепленной с низовой стороны железобетонной подпорной стеной. Левый близко подходит к автодороге.

По гребню дамбы проложен пульпопровод с ответвлением трубопроводов для слива пульпы в хвостохранилище. В чаще хвостохранилища уст-

роено водосборное сооружение шахтного типа с отводящим трубопроводом, по которому в р. Ардон осуществляется сброс осветленной части, поступившей в хвостохранилище пульпы.

Концентрация свинца в р. Ардон ниже хвостохранилища в 2 раза выше, чем до хвостохранилища и впадения р. Уналдон, а содержание в сливе хвостохранилища в 2 раз выше, чем в устье р. Уналдон. Вынос тяжелых металлов со сливом хвостохранилища в осенний период составляет, кг/с.: свинца - 0,187, кадмия - 0,008, цинка - 0,27.

Существенным фактором, определяющим загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (Pb, Zn, Cu, Cd), является дефляция поверхности хвостохранилища. В целях предотвращения дефляции используется принудительное орошение. С низового бьефа дамбы у водосборного колодца установлены насосы, подающие осветленную в хвостохранилище воду на пылеподавление намывного пляжа в верхнем бьефе. При интенсивном орошении значительная часть хвостов находится под зеркалом воды, что затрудняет доступ кислорода в глубокие слои и замедляет процессы окисления сульфидов.

Однако, как правило, покрыто водой только около 50% поверхности хвостохранилища. В зимний период полив не производится, и в малоснежные годы ветровая эрозия с поверхности хвостохранилища достаточно интенсивна, так как район характеризуется сильными ветрами вдоль ущелья.

Опробование поверхности сухой части хвостохранилища выявило следующие средние концентрации металлов (в %\* 10<sup>-3</sup>): 40 - Cu, 235 - Zn, 193 - Pb, 2,1 - Ni, 2,8 - Co, 16 - Cr, 4 - V, 0,5 - Mo, 0,4 - Ag, 190 - Mn, 28 - As, 1,3 - Sn, 2,3 - Bi, 168 - Ti, 14 - Zr, 46 - P, 1,2 - B, 0,6 - Cd.

По результатам дисперсионного анализа хвостов большая часть свинца приурочена к самой мелкой фракции ( $<0,006$  мм), для цинка характерно распределение по 4-м мелким фракциям ( $< 0,044$  мм).

По результатам спектрального анализа почв района Унальского хвостохранилища выявлено наличие высоких концентраций свинца, цинка, меди и серебра, обнаружены пробы с аномальными содержаниями кадмия, олова, висмута, ртути и мышьяка, превышающими минимально аномальные концентрации для почв. Аномалии в почвах характеризуются комплексностью состава: основной вклад в загрязнение помимо Zn и Pb вносят:  $Ag > Cu > Cd > Bi > As$ .

Объем утилизации отходов минерального производства не превышает первых процентов от объемов выдаваемых на земную поверхность. Основным препятствием для утилизации является то обстоятельство, что при обогатительном и металлургическом переделах возможности технологий не позволяют извлекать полезные компоненты, которые попадают в хвосты.

Объемы отвалов хвостов достигают миллионов  $m^3$ , металлургические заводы расположены в пределах городов, отвалы активно участвуют в формировании микроклимата таких городов, как Норильск, Магнитогорск, Усть-Каменогорск, Владикавказ и др., но не могут быть утилизированы без разработки технологий извлечения ряда компонентов.

Инженерными мероприятиями качество изделий из малоактивных отходов производства несколько улучшают. Доменные шлаки используются в качестве эквивалента цемента при соответствующей подготовке и без нее. В технологии приготовления строительных изделий реализуют идею обеспечивать

прочность при ухудшении качества исходных компонентов.

Особую трудность представляют хвосты гидрометаллургической переработки из-за создания твердой оболочки зерен. В хвостах гидрометаллургических заводов твердая фаза состоит из частиц с модулем крупности  $0,022-0,078$ , содержанием глинистых и пылевых частиц -  $39,2-36,8\%$ , в т.ч. глинистых -  $6,6-6,1\%$  насыпной плотностью хвостов -  $1,5-1,6$   $t/m^3$ ; удельной поверхностью до  $3600$   $cm^2/kg$  и естественной влажностью -  $18-26\%$ , т.е. мелкодисперсных.

Несмотря на дисперсность, хвосты содержат пылевидных частиц меньше, чем суглинки. В хвостах преобладает кремнезем ( $49,5-66,3\%$ ). Другие окислы ( $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $FeO$ ), содержащиеся в хвостах в количестве от  $1$  до  $10\%$  не влияют на прочность бетонов. Жидкая фаза содержит до  $17$   $г/л$  сульфат-иона  $SO_4^-$ , поэтому при затворении хвостов ГМЗ со шлаком, в котором содержится до  $50\%$   $CaO$ , образуется гипс, ускоряющий твердение бетона.

Многочисленными исследованиями по утилизации хвостов горного производства доказана возможность их рентабельной переработки с производством товарной продукции.

Хранение хвостов без последующей утилизации требует повышенных затрат на защиту от выветривания, окисления, вымывания, а также связанных с изъятием земель из сельскохозяйственного оборота.

Для обоснования экономической целесообразности переработки и утилизации хвостов обогащения и других отходов необходимо оценить не только современные достижения науки и техники, достигнутые в этом направлении, но и учитывать направления дальнейшего совершенствования тех-

ники и технологии добычи и переработки руд.

В условиях рынка решение задач повышения эффективности разработки рудных месторождений, в том числе задач заключительного цикла - утилизации извлеченных на поверхность геоматериалов должно осуществляться на основе оптимизированного критерия эффективности и единой эколого-экономической модели.

Анализом установлено, что наиболее перспективны геотехнологические способы обогащения. Однако одно только выщелачивание не отвечает требованиям современности, т.к. для этого необходимо продолжительное время. Следует оценить возможности технологий, сочетающих возможности комбинирования химической активации в электрохимических установках и механической активации в дезинтеграторах.

Роль хвостохранилищ в деградации окружающей среды определяется в ходе многолетнего эколого-геохимического картирования территории с опробованием почв, вод и донных отложений водотоков и мониторинговых исследований с опробованием почв, растительности, поверхностных вод, сухой части поверхности хвостохранилища и пылевых выбросов.

При исследовании загрязненности гидросферы дифференцируется влияние водных потоков по территории месторождений и стоков Унальского хвостохранилища. При исследовании загрязненности атмосферы изучаются дефляционные процессы с поверхности хвостохранилища и техно-

генная запыленность территории. При исследовании загрязненности литосферы литохимическими съемками устанавливается ареал рассеяния загрязняющих частиц хвостов, выносимых за пределы хвостохранилища растворами природного выщелачивания.

Для определения возможности минимизации влияния хвостохранилищ на окружающую среду исследуется возможность утилизации хвостов методами традиционной и новой технологии с извлечением металлов выщелачиванием. Для этого исследуются физико-механические свойства хвостов, их вяжущие свойства и параметры технологий активации хвостов как альтернатива процессам природного выщелачивания.

Определение эколого-экономических аспектов утилизации хвостов включает разделы: оценка сырьевой базы для промышленной утилизации хвостов, формулируется механизм поражения окружающей среды в случае хранения хвостов, определяется критерий эффективности утилизации хвостов и величина предотвращенного ущерба окружающей среде в случае реализации рекомендаций диссертации.

Результаты комплексных исследований закладываются в основу экономико-технологических закономерностей управления процессом переработки и утилизации хвостов на стадиях валового потребления, дифференцируемого по фракционному составу и активированного в аппаратах. **ИАС**

#### **Коротко об авторах**

*Бурдзиева О.Г.* – Центр геофизических исследований РАН, аспирант, [zaal@mail.ru](mailto:zaal@mail.ru).  
*Шевченко Е.В.* – Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, канд.эконом. наук, Шахты.

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 содержание 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 м<sup>3</sup>/т. При растворении изменяются кристаллические решетки минералов и газы высвобождаются, 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 зависит 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.

Это соотношение нарушается углекислотой, образуемой разложением в контуре хвостохранилища органических веществ азотными соединениями

### 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

ми, 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 кремнекислота. 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 радиолиз жидкой фазы «вода - руды - металлы», рождающий кислород в виде гидроксильных групп, гидропеременных 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 высоким содержанием радиоактивных компонентов в течение почти 2 веков в промышленных масштабах добывали на Садонских месторождениях и пе-



рерабатывали, 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 деградируют почвы. Избыток металлов отрицательно влияет на почвенную биоту и угнетает растения. Существенную опасность для почв представляют ра-

дионуклиды - 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:

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

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;  $K_\sigma$  – коэффициент влияния на биосферу;  $K_r$  – коэффициент глобальности;  $K_{вр}$  – 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 определять 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 величиной 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;  $E_{нд}$  - коэффициент 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, отличающихся 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:

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

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:

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

где  $P$  - продукция получения от утилизации, вес ед.;  $\Pi$  - цена продукции, ден. ед.;  $\mathcal{Z}_a$  - приведенные затраты на активацию, ден. ед./ед. веса;  $t_0$  и  $t$  - время начала и окончания работ;  $A$  - объем утилизации хвостов.

Экономический эффект, не учитываемый в денежном виде:

$$\mathcal{E}_{н,д} = \mathcal{E}_{з,к} + \mathcal{E}_{в,м} + \mathcal{E}_{с,п} + \mathcal{E}_{y,o} + \mathcal{E}_{г,д}$$

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:

$$\Pi_x = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (C_{т.о} - \mathcal{Z}_{о.о} - \mathcal{Z}_{о.м}) \cdot Q_0}{t_0} + C_{ш}^o + \frac{\sum_{i=1}^{n_M} (C_{т.м} - \mathcal{Z}_{о.м} - \mathcal{Z}_{м.м}) \cdot Q_M}{t_M} + C_{ш}^M,$$

где  $\Pi_x$  - годовая прибыль от переработки хвостов, руб./г;  $C_{т.о}$  - стоимость реализации продукции переработки хвостов, руб./г;  $\mathcal{Z}_{о.о}$  - затраты на обогащение хвостов обогащения, руб./г;  $\mathcal{Z}_{о.м}$  - затраты на металлургический передел хвостов обогащения, руб./г;  $n_0$  - 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/г;  $\mathcal{Z}_{о.м}$  - затраты на обогащение хвостов металлургии, руб/г;  $\mathcal{Z}_{м.м}$  - затраты на металлургический передел хвостов металлургии, руб/г;  $n_M$  - 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 прибли-

жений, 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).