© Н.Ю. Антонинова, Ф.Ф. Борисков, 2008

УДК 622.839.43.002.68:628.35

Н.Ю. Антонинова, Ф.Ф. Борисков

*ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ОТХОДОВ ЦИАНИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСТЕНИЙ СЕМЕЙСТВА РЯСКОВЫХ (LEMNA)**

Предложен новый способ защиты окружающей среды от последствий производства - кучного выщелачивания (КВ) золота цианидным методом и создания благоприятных условий для биологической рекультивации.

Семинар № 10

Первая в России установка кучного выщелачивания (КВ) золота цианидным методом была построена в 1994 г. на месторождении «Майское» (республика Хакасия) с запасами золота около 3 т, которые были погашены к 2000 г. Содержание золота в товарной руде при средней пробе золота, равной 961, составляло 4,3 г/т (1-й год добычи), из них величина амальгамируемого и цианируемого золота достигала соответственно 41,0 и 57,8 %. Установка КВ работала в сезонном режиме: май – октябрь с консервацией на зиму. Все оборудование освобождалось от технологических растворов: ими заполнялись 2 рабочие и 2 резервные емкости по 2000 м^3 для приема и хранения технологических растворов в зимний период [1]. Отвал руды, насыщенный цианидным раствором, на зиму1995 г. был заморожен, так как фактическое извлечение золота из руды, равное, 65,0 % было ниже проектного (74,26 %). Продуктивный раствор, вытекавший из-под отвала перед консервацией, содержал 1 г/м^3 золота. Лед, который образуется при замерзании раствора в порах руды при температуре $T \sim -2{,}2^{o}$ С, оказывает расклинивающее действие на их стенки, увеличивая объем этих полостей более чем на 10 %. Дезинтеграция руды льдом осуществляется в отвалах высотой, которая не превышает глубину промерзания грунта (2,5 м для Хакасии). Использование режима «замораживание руды зимой – оттаивание ее весной» улучшает доступ выщелачивающего раствора к тем частицам золота, которые не были раскрыты в процессе обычной рудоподготовки. Этот прием позволил поднять концентрацию золота в растворе до 4 г/м^3, превышающую промышленное содержание (> 1 г/м^3) в 4 раза. Наполнение отработанных секций на зиму технологическим раствором для дезинтеграции руды льдом производится практически без потерь реагентов, так как перерабатываемое сырье было насыщено ими до предела в процессе основного выщелачивания золота [2].

Затраты на строительство и эксплуатацию установки окупились за один 1995 год. Успешный опыт внедрения золотодобычи в Хакасии явился стимулом более широкого использования этого метода в России. Только на Урале цианидным КВ извлекается золото из руд месторождений

* Материалы подготовлены к печати при поддержке гранта РФФИ № 04-05-96103

Муртыкты, Кировское, Светлинское, Воронцовское, Березняковское и др.

Широкое применение цианида натрия – токсичного реагента обусловлено тем, что удельные затраты на очистку цианидных стоков ниже, чем на нейтрализацию альтерна-тивных выщелачивающих реагентов (гипохлорит натрия, обработанный хлоридом натрия для стабилизации; бром, стабилизированный бромидом натрия; тиосульфат аммония и тиомочевина и др.).

Безопасность применения цианидных методов в процессах КВ золота обеспечивается сооружением гидроизоляционного экрана для размещения на нем штабелей выщелачиваемого сырья, использованием защитной щелочи для подавления реакции гидролиза цианида и предотвращения тем самым загрязнения воздуха синильной кислотой, обезвреживанием отходов производства установки КВ и рекультивацией ее территории.

Хвостовые растворы выщелачивания с высокой концентрацией хлористого кальция, образовавшегося при обезвреживании растворов установки КВ в Хакасии гипохлоритом кальция, были сброшены в пруд-накопитель объемом 20 тыс. $м^3$ с гидроизоляционным экраном из глины на вечное хранение. Отрицательный баланс атмосферных осадков (превышение испарения осадков над их выпадением) в данном районе приведет к образованию солевого слоя на дне пруда при высыхании воды и выносу пыли $CaCl_2$ в окружающую среду с негативными экологическими последствиями.

Экологически безопасным и ресурсосберегающим способом обезвреживания отходов золотодобычи цианидным выщелачиванием является биологический метод. К одному из его вариантов следует отнести создание неглубоких (до 1 м) хорошо прогреваемых солнцем прудков на отработанных штабелях золотосодержащего сырья. Прудки, технологические емкости и контрольные водоемы заселяются растительными организмами разной размерности, цианобактериями, синезелеными водорослями и закрепляющимися на грунте растениями (камыш, рогоз, рдест и др.). Цианид, сохранившийся в капиллярах хвостов выщелачивания и в обезвреживаемых водах, подвергается деструкции на нейтральные компоненты (углекислый газ, азот) жизнедеятельностью организмов. В растворы вносятся удобрения для подкормки растений, чтобы создать благоприятную среду для их ускоренного роста и интенсификации процессов обезвреживания стоков.

Отдельные представители пресноводной флоры характеризуются значительной приспособляемостью к жизнедеятельности в воде с различной степенью загрязнения и являются важным фактором очищения водоемов от токсикантов. Это свойство было обнаружено также у растений семейства рясковых, которые размножаются даже в водоемах, расположенных неблагоприятных в экологическом отношении местах (около шоссе и т.д.). Водные растения этого семейства *Lemna minor*, *Lemna polyrrhiza* и *Lemna trisulca* используются для биологической очистки сточных вод животноводческих комплексов [3]. Ряска представляет собой округлую или продолговатую листовидную пластинку, от которой отходит корень. На Урале распространена ряска с размером пластинок ~ 4 мм. Она интенсивно размножается ветвлением пластинок в воде при pH ~ 8,0-8,7 с образованием сплошного зеленого покрова на поверхности водоемов. При pH меньше 5,0-5,2 растение погибает. Легкое выделение ряски из очищаемых вод предопределяет ее ценность при обезвреживания цианидных

стоков со щелочной реакцией. Цианиды являются азотными (цианистый натрий) или комплексными азотно-калиевыми (цианистый калий) удобрениями для растений и нейтральными соединениями для бескровных организмов.

Для интенсификации биологического обезвреживания цианидных стоков ряской использовались добавки минеральных удобрений и природных минеральных образований (почва из района установки КВ и известняк Хвощевского месторождения, расположенного в 3 км от установки КВ), т.е. модернизация известного метода добавками привела к созданию биоминерального способа нейтрализации токсикантов – узкой разновидности биохимических процессов очистки сточных вод. Технологический раствор установки кучного выщелачивания золота из руд Сафьяновского месторождения (100 км к ССВ от Екатеринбурга, г. Реж), содержащий 19,6 мг/л цианида (CN^-) и 45,8 мг/л роданидов (SCN^-), был налит в 3 лотка. Первый лоток (контрольный) содержал ряску в воде из природного водоема, где были взято это растение. Второй лоток предназначался для изучения процесса разложения цианида и роданидов микроорганизмами – аборигенами, которые находились в технологическом растворе установки КВ. Третий лоток, как и первый, заселили ряской, которая также закрывала 50 % водной поверхности. В раствор второго и третьего лотка вносился аммофос 50 г/м^3, в качестве минерального удобрения для подкормки микроорганизмов-аборигенов и ряски. Наблюдения проводились в течение поздней весны, лета и осени. За это время ряска в первом (контрольном) лотке пожелтела, подчиняясь смене времен года. Во втором лотке, где отсутствовала ряска, концентрация токсикантов сохранилась на прежнем уровне, несмотря на подкормку аборигенов аммофосом. В третьем лотке вегетативный период продолжался всю осень и зиму, когда лоток был перенесен в отапливаемое помещение. За 30 дней обезвреживания технологического раствора концентрация токсикантов в растворе этого лотка уменьшилась почти в два раза (цианида с 19,6 до 10,8 мг/л, роданидов – с 45,8 до 23,7 мг/л) за счет жизнедеятельности ряски, масса которой увеличилась в несколько раз.

Наблюдения за распространением ряски в районе Сафьяновского месторождения выявили ее интенсивное развитие в зумпфе и во впадинах дна карьера Хвощевского месторождения известняка (3 км от установки КВ), заполненных водой. Поэтому было предпринято изучение влияния вещественного состава ложа прудков на биохимическую очистку стоков КВ ряской от цианидов и роданидов. Во второй серии опытов на дне *2-го сосуда укладывался слой почвы установки КВ, 3-го – слой Хвощевского известняка.* Толщина слоя – 2 см, масса – 3 кг, крупность – 1 см, объем технологического раствора – 5 л. В каждый сосуд добавлялся аммофос в количестве 50 г/м^3 и ряска, которая закрывала, как обычно, 50 % водной поверхности раствора. Эксперимент продолжался 30 суток.

Результаты опытов показывают, что почва, известняк и добавка аммофоса усилили метаболизм ряски: исходная концентрация токсикантов снизилась соответственно: цианида в 4,1 и 6,5; роданидов – в 3,6 и 6,1 раз в стоках КВ.

Полученные растворы с содержанием цианида 3,0 мг/л и роданида 7,5 мг/л были использованы для обезвреживания хвостов кучного выщелачивания золота из окисленных руд Сафьяновского медно-колчедан-ного месторождения.

Влияние биоминерального метода очистки цианидных стоков КВ с использованием ряски, аммофоса и природных минеральных добавок

Продукт	Аммофос, г/м^3	pH	Концентрация, мг/л	
			Цианид	Роданид
Технологический раствор установки КВ	-	8,5	19,6	45,7
Раствор установки КВ с микроорганизмами – аборигенами прудков установки	50	8,2	19,0	45,7
Раствор установки КВ с ряской	50	8,1	10,8	23,7
Раствор с почвой установки КВ и ряской – 2 сосуд	50	7,7	4,8	12,7
Раствор КВ с известняком и ряской –3 сосуд	50	8,0	3,0	7,5
Жидкая фаза хвостов установки КВ, обработанных раствором из 1-го сосуда	50	8,4	0,2	0,8
Жидкая фаза хвостов установки КВ, обработанных раствором из 2-го сосуда	50	8,3	0,048*	0,08*

**Нормы ПДК для воды водоемов санитарно-бытового использования по цианиду 0,05; по роданиду 0,1 мг/л*

Обработка хвостов раствором из 2-го лотка, где ложем была почва, привела к уменьшению содержание цианида в жидкой фазе до 0,2 мг/л, роданида – до 0,8 мг/л, раствором из 3-го лотка с ложем из Хвощевского известняка – до 0,048 мг/л цианида и до 0,08 мг/л роданидов, т.е. этом эксперименте (с применением известняка) была достигнута концентрация токсикантов ниже норм ПДК (таблица).

Интенсификация метаболизма ряски в присутствии известняка объясняется, по-видимому, элементами и микроэлементами, входящими в его состав (кальций 40 %, магний 0,39 %, сера 0,01 %, калий 120-480 г/т, азот 16-17 г/т, марганец 3 г/т, медь 6 г/т), которые улучшают питание растений.

Безопасные санитарно-гигиенические условия работы персонала, обезвреживающего растворы от цианида и роданидов, обеспечиваются низкими содержаниями цианистого натрия (0,5-1,5 г/л) в растворе и подкреплением его щелочью до pH = 9-10. Этим поддерживается концентрация синильной кислоты в воздухе рабочей зоны ниже ПДК.

Геохимическая рекультивация, проводимая любыми методами (химическими, физическими, биологическими и др.), завершается, когда степень очистки воды и хвостов от загрязняющих веществ отвечает требованиям норм ПДК.

Технический этап рекультивации территории установок КВ обеспечивает:

- защиту окружающей среды от последствий производства;
- создание благоприятных условий для биологической рекультивации.

На территории установок КВ производится ликвидация земляных емкостей, выполаживание склонов отвалов для нанесения на поверхность нарушенных земель глинистого субстрата (мелкозема) и предотвращения его водной эрозии. На мелкоземе – основе почвенного слоя легче приживаются и закрепляются травянистые растения.

Биологический этап рекультивации направлен на восстановление агрохимических и агротехнических свойств почвы и создания устойчивого растительного покрова из многолетних трав. Для повышения скорости восстановления почвенного плодородия в нанесенный мел-

козем добавляются минеральные (карбамид, суперфосфат, хлористый калий и т.д.) и органические удобрения (торф). Биологическая рекультивация считается законченной при получении устойчивого травянистого покрова на площади не менее 60 %. Травянистый покров создается посевом семян многолетних трав (клевер красный, овсяница луговая, рейгас пастбищный, тимофеевка луговая и др.). В лесистых районах на площадках КВ со временем появляется древесная растительность. Посадкой ценных сельскохозяйственных и лесных культур реализуется заключительный этап биологической рекультивации в соответствии с ландшафтно-экологическим принципом, согласно которому на ранее нарушенных территориях необходимо создавать более продуктивные, рационально организованные и экологически сбалансированные участки [4].

Общее влияние установок КВ на окружающую среду по данным [5] находится в пределах установленных экологических нормативов. Воздействие этих установок не приводит к необратимым для природы последствиям, т.е. кучное выщелачивание не является экологически опасным производством при проведении перечисленного выше комплекса природоохранных мероприятий. Реабилитированные штабели хвостов гармонично вписываются, например, в природный ландшафт холмистой местности Урала при выполаживании углов откоса отвалов, близких к окружающим природным склонам по величине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисков Ф.Ф.* Кучное выщелачивание золота в России [Текст] / Ф.Ф. Борисков //Изв. Вузов. Горный журнал. – 1997. – № 11-12. – С. 193 - 198.
2. *Борисков Ф.Ф.* Импульсные и автогенные методы переработки сырья [Текст] /Ф. Ф. Борисков, В. Д. Алексеев. - Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2005. – 150 с.
3. А.с. 1121239 СССР, МКИ^4 С 02 F 3/32. Способ биологической очистки сточных вод животноводческих комплексов [Текст] / В.М. Шаларь, В.М. Могыдля (СССР). – № 3590904/23-26 (22); заявл. 17. 05. 1983; опубл. 21.07. 1984, Бюл. № 40. – С. 61.
4. *Хлопецкая Н.Ю.* Методологические основы реабилитации территории установок кучного выщелачивания золота [Текст] / Н.Ю. Хлопецкая, Ф.Ф. Борисков // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья с извлечением благородных металлов: труды международ. науч.-техн. конф.: в 3 чч.: ч. 3 / УГГГА.– Екатеринбург, 2002. – С. 3 - 6.
5. *Петров В.Ф.* Экологическая оценка установок кучного выщелачивания золота / [Текст] / В.Ф. Петров, С.В. Петров, Н.М. Мурашов // Горный журнал. – 2001. – № 5. – С. 56 - 58. ГИАБ

Коротко об авторах

Антонинова Н.Ю. – мл. научный сотрудник
Борисков Ф.Ф. – ст. научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук,
г. Екатеринбург, институт горного дела УрО РАН.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 10 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *Е.А. Ельчанинов.*