

УДК 579.669.213

БИОГЕОТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЗАБАЛАНСОВЫХ ЗОЛОТОСУЛЬФИДНЫХ РУД И КОНЦЕНТРАТОВ ГП «НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

¹ М.Г. Сагдиева, ² Д.Я. Мирталипов, ² З.Г. Сагдиева, ² З.В. Калинин, ² Л.М. Гилязетдинова

¹ ГП «Институт минеральных ресурсов» Госкомгеологии и минеральных ресурсов, Ташкент, Республика Узбекистан

² Институт микробиологии Академии наук, Ташкент, Республика Узбекистан

В последнее время во всех горнодобывающих странах мира особое внимание уделяется техногенному минеральному сырью (техногенные месторождения твердых полезных ископаемых), которое образуется в процессе добычи и переработки руд, что связано с одной стороны, с высокой ценой благородных и цветных металлов, с другой, с возрастанием интереса к освоению техногенных месторождений, содержащих цветные, благородные и редкие металлы.

Особое внимание уделяется биовыщелачиванию золота из отвальных золотосульфидных руд. В Российской Федерации рядом авторов проводятся лабораторные и укрупненно-лабораторные испытания кучного биовыщелачивания золотосульфидных руд, в США на месторождении Карлин успешно используется биотехнология переработки отвальных золотосодержащих руд на куче производительностью 3 млн тонн руды (1–4).

Проблема переработки отвальных забалансовых руд актуальна и для Государственного предприятия «Навоийский горно-металлургический комбинат» Республики Узбекистан. С 2008 года на Гидрометаллургическом заводе 3 (ГМЗ-3) запущена технология биоокисления флотоконцентратов, полученных из руд месторождений Кокпатас и Даугызтау. На сегодняшний день количество отвальных забалансовых сульфидных руд месторождений Кокпатас и Даугызтау составляет около двадцати миллионов тонн.

Биотехнология переработки забалансовых руд месторождения Кокпатас

В работе использовали технологическую пробу руды КС-15 – забалансовые сульфидные руды месторождения Кокпатас с различным классом крупности руды: -3 + 0 мм; -10 + 0 мм и -25 + 0 мм. В таблице 1 представлены данные химического анализа исходной руды.

Таблица 1 Данные химического анализа исходных проб отвальных руд

№ проб	Содержание, %						
	Au, г/т	As	Fe _{общ}	S _{общ}	S _{сульф.}	C _{орг}	CO ₂
КС – 15	1,3	0,423	5,82	2,27	1,92	0,16	5,5

Как видно из данных таблицы 1, содержание золота составляет 1,3 г/т, сульфидной серы 1,92 %, углерода органического 0,16 %. По данным рационального анализа цианируемое золото в руде КС-15 составляет 0,34 г/т (26,1 %), золото тонковкрапленное в сульфидах – 0,61 г/т (47 %), а золото тонковкрапленное в пороодообразующих минералах – 0,25 г/т (19,2 %).

Цианируемое золото в руде КС-15 составляет 0,36 г./т (27,7 %), а золото тонковкрапленное в сульфидах – 0,69 г./т (53,1 %), а тонковкрапленное золото в порообразующих минералах – 0,21 г./т (16,1). Проба руды по химическому и рациональному анализам относится к забалансовым сульфидным рудам. При проведении лабораторных и укрупненно-лабораторных испытаний по биовыщелачиванию отвальных руд при различном классе крупности руды: -3 + 0 мм; -10 + 0 мм и -25 + 0 мм были определены влагоемкость, проницаемость, расход серной кислоты. Показано, что эти параметры зависят от класса крупности руды: чем мельче руда, тем больше влагоемкость и расход серной кислоты и меньше проницаемость. Процесс закисления руды длился 49 суток. На рисунке представлено изменение величины pH растворов в процессе закисления отвальной руды КС-15. В стадии закисления величина pH растворов снижается от 8,2 до 2,5, при этом количество железо- и сероокисляющих бактерий увеличивается от 0 до $6,0 \times 10^4$ кл/мл и $2,5 \times 10^2$ кл/мл соответственно, а численность тиосульфатоокисляющих снижается от $2,5 \times 10^6$ кл/мл до 0. После закисления руды для интенсификации процесса биовыщелачивания руду орошали ацидофильной ассоциацией железо-сероокисляющих бактерий 4КП, выделенной из сульфидных руд месторождения Кокпатас, при этом количество железоокисляющих бактерий на предлагаемой нами среде практически не отличается от численности бактерий, выращенных на среде 9К (6).

Результаты лабораторных и укрупненно-лабораторных испытаний, проведенных в течение 10 месяцев и 8 месяцев соответственно, показали, что несмотря на высокую карбонатность отвальных забалансовых руд месторождения Кокпатас, метод кучного биовыщелачивания пригоден для переработки отвальных забалансовых сульфидных руд месторождения Кокпатас. В целом, наблюдается общая тенденция во всех вариантах эксперимента: в твердых пробах численность бактерий выше, чем в растворах, что свидетельствует о прикреплении клеток к поверхности руды и окислении сульфидных минералов. Клетки, находящиеся в растворах, окисляют закисное железо в окисное и восстановленные соединения серы, которые образуются за счет окисления серы сульфидной.

Результаты химического анализа биокеков показали, что содержание золота увеличилось от 1,3 до 1,8 г/т, содержание сульфидной серы уменьшилось от 1,92 % до 0,97–1,08 %, что свидетельствует об активном разрушении в руде сульфидных минералов: арсенопирита и пирита. Результаты рационального анализа биокеков подтверждают данные химического анализа: процент извлечения свободного золота из руды равно 63,3 % (-3 + 0); 60,7 % (-10 + 0); 57,5 % (-25 + 0), что свидетельствует об увеличении процента извлечения свободного (цианируемого) золота на 36,6 % (-3 + 0); 33,0 % (-10 + 0) и 29,8 % (-25 + 0) соответственно. Аналогичные данные были получены при проведении укрупненно-лабораторных испытаний на массе руды 25 кг, которые проводились в течение 8 месяцев. Биокеки укрупненно-лабораторных испытаний подвергались сорбционному цианированию, данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 Результаты сорбционного цианирования продуктов после биовыщелачивания проб руды КС-15 с различным классом крупности (масса руды 25 кг)

Класс крупности	Показатели цианирования					Результаты цианирования			
	Время, час		Концентрация NaCN, мг/л		pH	Содержание Au, г/т			Извлечение Au, %
	Предв. цианир.	Сорбц. цианир.	Начальная	Конечная		Исх.	После предв. цианир.	В хвостах сорбции	
-25 + 0	6	12	250	240	10,6	1,4	0,98	0,85	39,3
	-	18	250	240	10,5	1,4	–	0,76	45,7
-10 + 0	6	12	250	230	10,5	1,5	0,87	0,69	54
	-	18	250	240	10,5	1,5	-	0,69	54
-3 + 0	6	12	250	230	10,6	1,7	0,57	0,41	75,9
	-	18	250	220	10,5	1,7	–	0,27	84,1

Результаты сорбционного цианирования биокеков исследуемой руды показали, что извлечение золота из продуктов после биовыщелачивания руд обратно пропорционально классу крупности, т. е. чем мельче частицы руды, тем выше извлечение золота: -25 + 0 мм – 39,3 и 45,7 %, -10 + 0 мм – 54 и 54 %, -3 + 0 мм – 75,9 и 84,1 %.

Следует отметить, цианирование продуктов после биовыщелачивания руды крупностью $-10 + 0$ мм и $-3 + 0$ мм превышает 50 %. Испытания разрабатываемой биотехнологии переработки технологической пробы К-15 на пилотных установках показали, что за 6 месяцев процент окисления сульфидной серы колеблется от 70,8 до 85,1 %, а извлечение золота сорбционным цианированием достигает 76–82 %. На основании проведенных испытаний кучного биовыщелачивания забалансовых руд месторождения Кокпатас разработан технологический регламент для проведения полупромышленных испытаний на массе руды 100 тонн.

Таким образом, результаты рационального анализа и сорбционного цианирования биокеков подтверждают, что забалансовые руды, несмотря на то, что они являются высококарбонатными и упорными, они подвергаются бактериальной обработке, что свидетельствует об их пригодности для переработки методом кучного биовыщелачивания.

Биотехнология переработки золотосульфидных концентратов НГМК

Проблема переработки золотосульфидных руд и концентратов актуальна и для Республики Узбекистан, так как большинство золотосодержащих месторождений республики характеризуются упорными золотосульфидными рудами. За исключением уникального месторождения Мурунтау и некоторых отработанных месторождений (Пирмираб, Гузаксай, Каульды) практически все остальные крупные золотосодержащие месторождения, как Кокпатас, Даугызтау, Зармитан, Маржанбулак, Кочбулак, Амантайтау, Аджибугут, а также мелкие – Сармич, Биран и другие, характеризуются рудами, которые относятся к труднообогатимым золотосульфидным рудам, переработка которых классическими способами нерентабельна (5, 6).

В 2008 году на Гидрометаллургическом заводе № 3 (ГМЗ-3) Навоийского горно-металлургического комбината (НГМК) запущен цех биоокисления флотоконцентратов, полученных при обогащении сульфидных руд месторождений Кокпатас и Даугызтау. С целью выяснения низкой окисляемости сульфидных минералов в цехе биоокисления флотоконцентратов ГМЗ-3 проведен анализ микробиологической активности при биоокислении флотоконцентратов, на основе которого было выявлено следующее:

- Флотоконцентрат, полученный из сульфидных руд месторождения Даугызтау, обладает двойной упорностью, что негативно сказывается на показателях технологического процесса;

- Непостоянство среды обитания для ацидофильной ассоциации железо – сероокисляющих бактерий в первичных биореакторах, связанное с разнообразием вещественного состава флотоконцентратов, полученных из руд месторождений Кокпатас и Даугызтау;

- Высокое содержание углистых веществ в рудах месторождений Кокпатас и особенно Даугызтау. Эти соединения оказывают незначительное действие на геохимическую активность ассоциации бактерий, но они оказывают негативное влияние на процесс сорбционного цианирования, так как обладают способностью сорбировать растворенное золото. Кроме того, флотоконцентраты месторождений Кокпатас и Даугызтау содержат в достаточном количестве золото, которое не извлекается в процессе биоокисления, что сказывается на показателях сквозного извлечения основного металла;

- Процесс окисления, т. е. разрушения минералов, приводит к тому, что не перешедшие в раствор элементы претерпевают ряд изменений. Они могут либо войти в состав вновь образованных соединений, не меняя своей валентности (кальций переходит в состав гипсов) или, как в случае серы, увеличивают свою реакционную способность за счет частичного окисления. Таким образом, показатель «сульфидная сера», определяемый как разность между содержанием общей серы и сульфатной, дает только суммарное количество восстановленных соединений серы с валентностью от $+4$ до -2 , а не их качественный состав. Наличие таких соединений серы в твердой фазе, на наш взгляд, незначительно сказывается на активности бактериального вскрытия сульфидов, но может негативно влиять на эффективность последующих стадий технологического процесса (7);

- Проводимые нами исследования по биоокислению флотоконцентрата, собственные эксперименты и наблюдения позволяют считать, что оптимальным значением pH пульпы является pH 1,6–1,8;

- Защелачивание пульпы известняком способствует увеличению плотности пульпы за счет образования гипса, который оказывает негативное действие на процесс биоокисления флотоконцентрата, нейтрализуя такой сильный окислитель, как трехвалентное железо, и кроме того, известняк способствует также обильному пенообразованию в биореакторах.

Для решения указанных проблем предлагаются следующие возможные пути:

- Для более полного окисления сульфидной серы на самом участке биоокисления флотоконцентрата необходимо увеличить фронт процесса, за счет увеличения количества биореакторов – четыре первичных и четыре вторичных;

- Использование жидкой фазы пульпы в качестве оборотных растворов с активной ассоциацией железо – серуокисляющих бактерий и возвращение ее в первичные биореакторы, что позволит интенсифицировать процесс биоокисления флотоконцентратов;

- Оптимальным рН пульпы в биореакторах следует считать рН 1,6–1,8, что позволит в значительной степени уменьшить количество используемого известняка;

- Целесообразно на первой линии цеха биоокисления перерабатывать флотоконцентрат, полученный из руд месторождения Кокпатас, на второй – месторождения Даугызтау с подбором оптимальных показателей технологического процесса для каждой линии.

Для повышения экономической эффективности работы ГМЗ-3 проведены исследования по замене импортируемых из России компонентов: диаммоний фосфата и сульфата калия на местные реагенты – аммофос и сульфат калия, производимые ОАО "Максам – Чирчик" (8). Замена диаммоний фосфата на аммофос была внедрена в 2011 году на ГМЗ-3 и имеет высокую экономическую эффективность.

Таким образом, проведенные на ГМЗ-3 научно-исследовательские работы по анализу микробиологической активности при биоокислении флотоконцентратов, по подбору питательной среды с использованием местных реагентов и предлагаемые рекомендации позволят интенсифицировать процесс биоокисления флотоконцентратов и повысить экономическую эффективность.

В 2010 году в НГМК был запущен ГМЗ-4, который перерабатывает окисленные золотосодержащие руды месторождения Зармитан. Однако известно, что нижние слои месторождения характеризуются высоким содержанием арсенопирита и пирита.

С целью разработки технологии бактериального вскрытия золота из золотомышьяковистых концентратов месторождения Зармитан были проведены исследования по пригодности флотационного концентрата, полученного из руд месторождения Зармитан, с содержанием мышьяка 16,2 %. В работе были испытаны 5 различных кислотолюбивых ассоциаций тионовых бактерий с преобладанием *Acidithiobacillus ferrooxidans*, выделенных из месторождений Зармитан при следующих условиях культивирования: диапазоны соотношений твердой и жидкой фазы от Т: Ж = 1:5 до Т: Ж = 1:50, температуре 28–32°C, рН 1,8–2,2 и при различных условиях аэрации. На основании проведенных исследований было показано, что для бактериального вскрытия золота из флотоконцентрата Зармитан оптимальны: ассоциация *At. ferrooxidans* В-12, выделенная из руд данного месторождения, температура 28–32°C; рН 1,8–2,2; Т: Ж = 1:5, аэрация 0,2–0,4 л/сек. При бактериальном вскрытии флотоконцентрата в отмеченных выше оптимальных условиях концентрация бактерий через 7 суток составляла 10^7 – 10^9 кл/мл, концентрация мышьяка 8,2–8,6 г/л, из которой 80 % составляла As^{3+} , концентрация железа в растворе – 18,6 г/л, из них 16,6 г/л оказалось Fe^{3+} , активность бактерий по железу – 3,5–4,8 г/л час, Eh – 580 мВ. Проведенные лабораторные эксперименты показали, что флотоконцентрат месторождения Зармитан пригоден для бактериального выщелачивания, а эффективность процесса зависит от активности культуры, от вещественного и минералогического состава концентрата и условий выщелачивания. Лабораторные испытания эффективности бактериального вскрытия золота из флотоконцент

рата месторождения Зармитан проводили в совместных исследованиях с Институтом микробиологии РАН и Московским институтом стали и сплавов (МИСиС). Выщелачивание проводили в установке МИСиС (на протоке) и установке «БИЛАФ» Института микробиологии РАН. В работе использовали ассоциацию *At. ferrooxidans* В-12. Выполненные лабораторные и укрупненно-лабораторные испытания бактериальной технологии показали, что в процессе бактериального вскрытия золота за 100–120 часов выщелачивается более 90 % мышьяка. При этом содержание его в пачуках составляло 6–7 г/л, железа 14–18 г/л, концентрация бактерий варьировала от 10^7 до 10^9 кл/мл, рН 1,5–2,2, Eh среды увеличился от 420 мВ до 620 мВ. После бактериального вскрытия биореакторы подвергали цианированию, данные которого отражены в таблице 3.

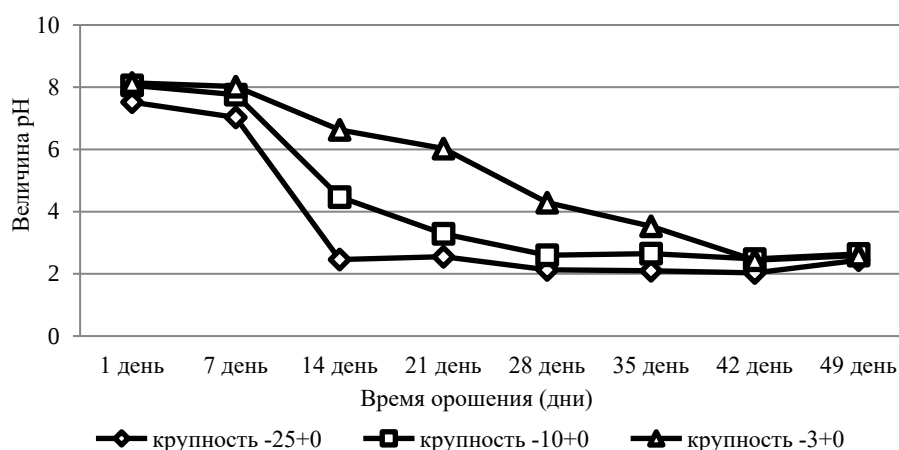


Рис. Изменение величины pH растворов в процессе закисления руды

Результаты экспериментов по извлечению золота методом цианирования флотоконцентрата Зармитан показали, что после бактериальной обработки извлечение его увеличивается от 67,16 % до 89–92 %, а серебра от 39,25 % до 62–66 % (9).

Таблица 3 Извлечение золота методом цианирования биокека после бактериального выщелачивания золотомышьяковистого концентрата месторождения Зармитан

Образец	Содержание As в концентратах, %	Извлечение драгметаллов после цианирования, %	
		Au	Ag
Исходный концентрат	16,20	67,2	39,5
Биокек 1	1,58	89,0	66,7
Биокек 2	1,46	92,3	62,0

На основании проведенных исследований технологии бактериального вскрытия золота из золотомышьяковистого концентрата был разработан лабораторный регламент и рассчитан ожидаемый экономический эффект от внедрения данной технологии, который по предварительным данным составил 25–30 % от прибыли в год.

ЛИТЕРАТУРА

- Седельникова Г.В., Крылов Г.С., Королев Н.И. Зеленев В.И. Кучное выщелачивание перспективный способ переработки техногенного золотосодержащего сырья // Руды и металлы 2000, № 5 с. 63–65;
- M.E. Clark, J. Batty, C. van Buuren, D. Dew and M. Eamon Biotechnology In Minerals Processing: Technological Breakthroughs Creating Value // Proceedings of 16th International Biohydrometallurgy Symposium, Cape Town, South Africa, 25–29 September 2005, p. XVII-XXIV.
- Адамов Э.В., Панин В.В. Биотехнология металлов // Москва, Изд-во МИСиС, 2008, 152 с.
- Rawlings D.E., Dew D., Plessis C. Biomineralization of metal-containing ores and concentrates // TRENDS in Biotechnology. 2003. Vol. 21, № 1. P. 38–44.
- Сагдиева М.Г., Борминский С.И. Технология бактериального вскрытия золота из золотомышьяковистого концентрата // Журнал «Горный вестник Узбекистана», 2003, с. 51–54.
- Мустакимов О.М., Магбулова Н.А., Мирталипов Д.Я., Цой А.В. Развитие биогидрометаллургии золота в Республике Узбекистан. // Журнал «Горный вестник Узбекистана». № 2, 2014. с. 84–88.
- Санакулов К.С., Сагдиева М.Г. Биогидрометаллургия в Республике Узбекистан: состояние, проблемы и перспективы развития // Журнал «Горный вестник Узбекистана». № 1, 2015. с. 3–5.
- Мустакимов О.М., Мавжудова А.М., Черкасова Г.В., Сагдиева М.Г. Подбор оптимальных питательных сред для биоокисления флотационного концентрата месторождения Кокпатас / Журнал «Горный вестник Узбекистана» 2012. № 3 с. 58–61.
- Сагдиева М.Г., Голобородько В.И., Айропетова Ж.С., Зайнитдинова Л.И. Бактериально-химическое вскрытие золота из Зармитанского золотомышьяковистого концентрата // ДАН РУз, 1995, № 1, с. 45–47.