

3. Матвеев И.В., Шеклеин Н.С., Кузембаев С.Б. Реологические и математические основы динамических и импульсных методов уплотнения: учеб. пособие. М.: Завод-вуз, 1986. 98 с.

УДК 622.342
ТУРСУНБАЕВА А.К.

Биогеотехнология благородных металлов из забалансовых руд и техногенных отходов горной промышленности

При переработке забалансовых руд и металлосодержащих пород вскрыши, горной массы отвалов и хвостохранилищ горно-добывающих и перерабатывающих предприятий, руд со сложным вещественным составом, а также комплексного сырья с тонкой вкрапленностью ценных компонентов, являющихся труднообогатимыми, применяют бактериальное выщелачивание, которое, разделив на процесс самого выщелачивания, миграции и осаждения металлов, рассматривают в аспекте двух направлений [1]:

1. Микроорганизмы разрушают кристаллическую решетку упорных руд, содержащих металл в виде тончайшей эмульсионной вкрапленности в арсенопирите и пирите, и вскрывают золото и серебро, обеспечивая доступ к нему растворителей. В результате достигается высокая степень извлечения металла, до 90 %, тогда как без предварительной бактериальной обработки выщелачивание золота не превышает 30-50 %.

2. Продукты метаболизма бактерий и сами микроорганизмы выполняют роль золоторастворяющих реагентов [2].

В процессе бактериального выщелачивания происходит окисление минералов, предполагающее наличие противоположного процесса – восстановления на окислителе, находящемся в электролите (ион Fe^{3+} и др.) и потребляющем электроны окислителей реакции. В бактериальном варианте таким потребителем электронов является клетка микроорганизма, стимулирующая процесс химического окисления минерального сырья. В результате микроорганизм выступает в роли окислителя, а с точки зрения электрохимической модели процесса выщелачивания – катода. Минерал, становясь донором электронов для бактерии, занимает в этой системе анодную позицию интенсивного окислителя и обеспечивает его разрушение. Мембрана клетки бактерий обладает цитохромом, имеющим сульфатредуктазную систему, участвующую вместе с сульфатионом в синтезе ферментов аденозинфосфосульфата (АФС), являющегося акцептором электронов. Сульфатредуцирующие процессы в клетке могут быть представлены реакцией:



Сульфатредуцирующие бактерии добывают электроны для восстановительных реакций путем окисления в рудах и растворах органических веществ. При изучении биохимического состава продуктов метаболизма золоторастворяющих бактерий установлено наличие значительного количества аминокислот, белков и пептидов, также обладающих высокой золоторастворяющей способностью. Связь в аминокислотном

комплексе золота осуществляется за счет электростатического притяжения ионов Au^+ и Au^{3+} , ионизированных в щелочной среде карбоксилатом и их донорно-акцепторным взаимодействием с атомами азота аминогруппы. Наиболее прочные комплексы золота образует с аспаргином и гистидином. В кислой среде аминокислоты восстанавливают ионные формы золота до металлов.

Для бактериального выщелачивания металлов применяли лабораторные штаммы бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* (Th. ferrooxidans), выделенных из карьерных вод Коунрадского месторождения [3], которые выращивались в среде следующего состава, г/л: серная кислота – 2-5; железный купорос – 15-20; сульфат аммония – 0,5-1; фосфорнокислый калий – 0,5; сульфат магния – 0,5. Для аэрации воздух подавали из компрессора в количестве 1 объем среды в час. В исследованиях использовано кислотостойкое оборудование и агитаторы с объемом 0,5 до 20 литров. В растворах выщелачивания определялось содержание As, Sb, Fe^{3+} , Fe^{2+} , H_2SO_4 , pH и количество бактерий Th. ferrooxidans; в растворах цианирования – Au, NaCN, NaOH; в твердом остатке – Au, Ag, As, Fe, S. Кроме того, твердые материалы до и после бактериальной обработки анализировали на рудные и нерудные минералы и на структурные изменения состава твердых материалов. При исследованиях выполняли следующие технологические операции:

- промывка отходов цианирования от следов флотореагентов и других примесей, отрицательно влияющих на жизнедеятельность бактерий (Т:Ж = 1:5; H_2SO_4 – 1-2 %; Т – 15-25 °С; время агитации – 1ч);

- бактериальное вскрытие золота из промытого кека при соотношении твердой фазы к жидкой 1:5; pH раствора 1,5-2, содержании Fe^3 в растворе до 4-8 г/л и количестве бактерий Th. ferrooxidans до 10^6 - 10^8 кл/мл при продолжительности агитации до 5-7 суток;

- промывка кека после бактериальной обработки до нейтральной pH и защелачивание до pH раствора 10;

- извлечение золота из кеков биовыщелачивания цианированием при соотношении твердой фазы к жидкой 1:4, 0,1-0,5 % раствором гидроксида натрия, содержащим 0,1-0,2 % цианистого натрия продолжительностью 24 часа.

Лабораторные исследования проводили с кеком цианирования руд Васильковского месторождения, содержащих до 2,5 % мышьяка, 0,3 % сурьмы и 13,62 г/т золота. Мышьяк в пробе находился в составе арсенопирита, сурьма в антимоните, а железо в арсенопирите и пирите. Образцы исследований массой по 100 г

промывали 0,5 л 1 % раствора серной кислоты в течение 1 часа. Твердый остаток выщелачивали 0,5 л бактериального раствора в течение 6 суток.

Полупромышленные испытания методики бактериального выщелачивания проводили в агитаторе емкостью 20 л. Для этого 3 кг отходов цианирования, содержащих золото 18 г/т, промывали 15 л 1 % раствора серной кислоты. После фильтрации промытый кека выщелачивали 15 л бактериального раствора, содержащего 6,2 г/л Fe^{3+} и 10^8 кл/мл бактерий *Th. ferrooxidans*, в течение 6 суток, затем промывали и цианировали.

Бактериальное вскрытие отходов цианирования показало, что в начальный период опыта в результате окислительно-восстановительных процессов концентрация трехвалентного железа снижается до 4 г/л и в среде появляются ионы двухвалентного железа. В конце опыта все железо в растворе окисляется до Fe^{3+} . Концентрация мышьяка в растворе доходит до 2,8 г/л и при этом извлечение его составляет 56,2 %. Известно, что при pH 2,1-2,5 20-30 % пентавалентного мышьяка связывается с ионами Fe^{3+} и выпадает в осадок в виде $FeAsO_4$. По этой причине в растворах выщелачивания всегда наблюдается снижение концентрации Fe^{3+} и As^{5+} . Результаты бактериального выщелачивания отходов цианирования при pH = 2,51 и концентрации *Th. ferrooxidans* 10^8 кл/мл представлены в таблице 1 и 2. Установлено, что все железо окисляется до Fe^{3+} и в раствор переходит 47,7 г мышьяка, т.е. его извлечение составляет 57,3 %, а сурьмы – незначительно – всего 3,66 %.

Таблица 1 – Результаты бактериального вскрытия отходов цианирования

№ п/п	τ , сут	Содержание Fe, г/л			Извлечение As, %		
		Fe^{3+}	Fe^{2+}	$Fe^{общ}$	мг/л	мг	%
1	1	7,5	0	7,5	-	-	-
2	2	6,0	1,5	7,5	682,5	341,25	-
3	3	4,6	0,7	5,3	698,75	349,3	-
4	4	4,0	0,5	4,5	708,8	354,4	-
5	5	4,5	сл.	4,5	673,14	336,57	-
6	Сумма	-	-	-	-	1397,5	56,2

Таблица 2 – Результаты опытно-промышленных испытаний бактериального выщелачивания золотосодержащих кеков

τ , сут	T , °C	Содержание железа, г/л			Извлечение мышьяка, мг/л	Извлечение сурьмы, мг/л
		Fe^{3+}	Fe^{2+}	$Fe^{общ}$		
1	10	6,2	сл.	6,2	-	-
2	10	5,7	сл.	5,7	505,0	2,42
3	11	5,0	0,7	5,7	1047,5	1,7
4	23	4,6	0,3	4,9	-	1,47
5	25	4,6	сл.	4,6	1305,6	1,75

6	27	5,1	0	5,1	-	1,98
7	25	5,0	0	5,0	2850,8	2,2

Для выяснения характера и степени воздействия бактерий *Th. ferrooxidans* на отходы цианирования проведены рентгенофазовые минералогические анализы проб до и после бактериального выщелачивания, которые показали, что в исходные образцы входит слоистый силикат типа мусковита $KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$ и магнезиального шамозита, $Fe, Mg, Al[Si_3AlO_{10}] \cdot nH_2O$, полевой шпат типа альбита $Na[AlSi_3O_8]$, предполагается наличие $CaCO_3$ и $FeCO_3$ (рисунок).

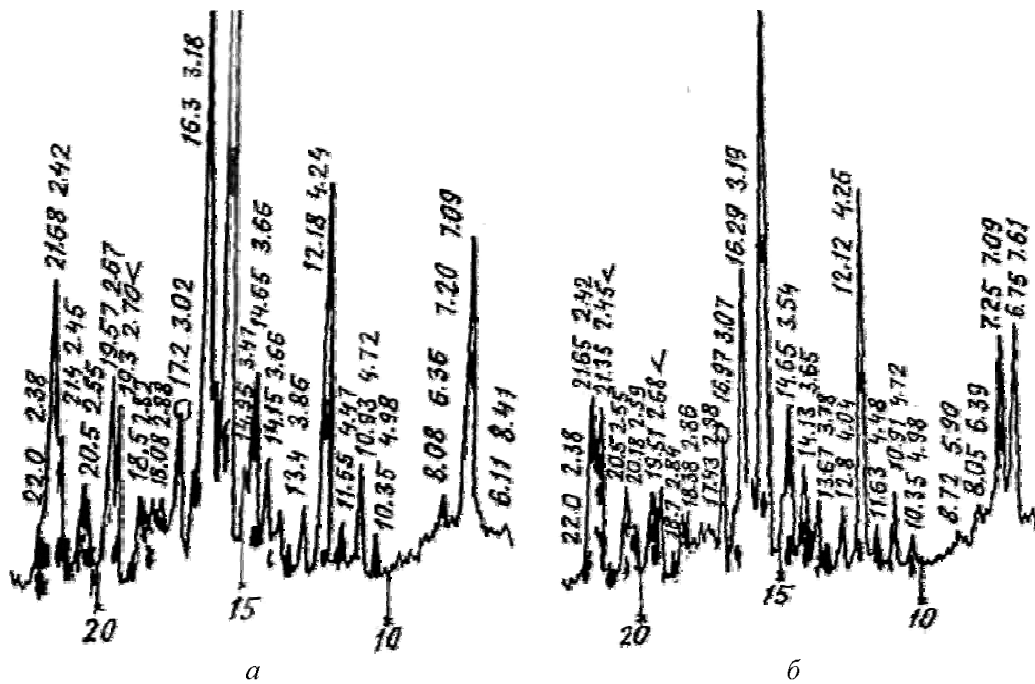
Цианирование продуктов бактериального выщелачивания проводили в сравнении с пробами, которые бактериальную обработку не проходили. Анализ извлечения золота показал преимущество бактериальной обработки отходов цианирования: если цианирование кека, не подвергнутого бактериальному выщелачиванию, позволяет извлечь золота не более 19-22 %, то из техногенного отхода с предварительной бактериальной обработкой цианирования извлечение на 60 % больше, т.е. составляет 80 % и более (таблица 3). К тому же в результате бактериальной обработки *Th. ferrooxidans* кека цианирования в раствор переходит до 57,3 % мышьяка и 3,66 % сурьмы.

Таким образом, выщелачивание золота микроорганизмами является перспективным направлением для переработки бедного упорного минерального сырья с тонковкрапленным золотом, которое позволит извлекать золота более 80 % и решать экологическую проблему утилизации кеков, содержащих такие токсичные элементы, как мышьяк и сурьма.

Отходы бактериального выщелачивания и кеки цианирования обеззараживали хлорной известью в течение 3 суток, которая реагировала с цианидом до безвредных цианатов, переводила мышьяк и сурьму в суспензии и полностью разрушала жизненные функции *Th. ferrooxidans*. Нейтрализацию и очистку кеков горной массы и остаточных растворов выщелачивания производили щелочным пассиватором после промывки с расходом 0,1-0,15 м³/т руды. В результате ПДК по мышьяку соответствовала ПДК питьевой воды, а цианиды и *Th. ferrooxidans* не обнаружены.

Таблица 3 – Сравнительные результаты извлечения золота из кека

Варианты	Пробы	$Au_{исх}$ г/т	Извлечение Au в раствор			Извлечение Au по твердому остатку		
			мг/л	м/л	%	до, г/т	после, г/т	%
Контроль	1	7,60	0,46	0,23	30,2	7,60	5,92	22,1
Контроль	2	13,62	0,84	0,42	32,3	13,62	12,0	19,1
Кека бактериального вскрытия	1	7,60	1,40	0,70	92,1	7,60	1,32	82,7
	2	13,62	2,47	1,235	95,0	13,62	2,74	80,0
	3	18,0	3,27	1,635	90,8	18,0	3,33	81,5



Рентгенограмма хвостов до бактериальной обработки *а* и после *б*.
 AlSiO_2 – 4,25 (8) – 3,343 (10) – 2,456 (6) – 2,281 (6) – 2,236 (5) и др.;
 FeAsS – 2,662 (10) – 2,443 (9) – 2,142 (9) – 1,187 (0) – 1,629 (8);
 шамозит – 7,04 (10) – 3,513 (10) – 2,796 (9) – 2,514 (9) – 2,137 (6) – 1,551 (7);
 альбит – 4,016 (7) – 3,767 (6) – 3,660 (7) – 3,206 (7) – 3,179 (10) – 2,952 (6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабиров В.В., Забельский В.К., Воробьев А.Е. Прогрессивные технологии добычи и переработки золотосодержащего сырья / Под ред. акад. Н.П. Лаверова. М.: Недра, 1994. 272 с.
2. Воробьев А.Е., Каргинов К.Г., Козырев Е.Н., Ашихмин А.А. Физико-химическая геотехнология золота. Владикавказ: Ремарко, 2001. 568 с.
3. Кенжалиев Б.К., Абсалямов Х.К., Камалов М.Р. и др. Биотехнология доизвлечения золота из отходов цианирования // Комплексное использование минерального сырья. 2002. № 1. С. 44-47.

УДК 622.7.017.2
ЖАҢБАТЫРОВ А.А.

Лабораторные и опытно-промышленные исследования выщелачивания золотосодержащих руд

Технологическая оценка руд месторождения была проведена в 1990 году ЦЛ ПО «Киргизгеология» на руде, содержащей Au 5,4 г/т, Ag 1,7 г/т и Cu – 0,16 %. Вес пробы 57,7 кг, начальная крупность 50 мм. Наличие свободного и относительно крупного Au предопределило применение гравитации в «голове» схемы. При этом в гравиконцентрат извлечено Au при его содержании 117,6 г/т. Переработка хвостов гравитации возможна по двум направлениям – флотационному и гидрометаллургическому – выщелачивание в цианистых растворах. В обоих случаях получены отвальные хвосты обогащения (0,47 и 0,24 г/т соответственно). Сквозное извлечение Au по гравитационно-флотационной технологии – 92 %, гравитационно-цианистой – 95,7 %. Сделан вывод, что руда может перерабатываться по известным технологиям с достаточно высокими показателями.

В 1991 г. в ВНИИХТе провели исследования применительно к условиям кучного выщелачивания. В результате исследований было установлено:

1. Руды относятся к золотосульфидному типу с двумя основными ассоциациями: золото-пиритовая и золото-пирит-халькопиритовая. Золото, в основном, представлено самородной формой с вкрапленно-прожилковым распределением среди агрегатов сульфидов. Содержание Au – 3,1 г/т. Вес пробы 280 кг. Руды частично окисленные, количество легко шламующихся минералов составляет – 17 %, карбонатов – 11 %.

2. Возможна реализация процесса кучного выщелачивания Au из руд с приемлемыми технологическими показателями. Опыты проведены на укрупненно-лабораторной установке (загрузка руды 124 кг) в режиме инфильтрационного цианидного выщелачивания. Выщелачивание проведено на материале крупно-