

УДК 579. 82

ГЛУБОКОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗОЛОТА ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКБАКАЙ КУЛЬТУРОЙ ACIDITIOBACILLUS FERROOXIDANS

¹Канаев А.Т., ¹Канаева З.К., ¹Мырзаханова И.А., ¹Уразбекова Г.Е.,
²Сатыбалдиева Г.К., ¹Мусаев К.Л.

¹Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы,
e-mail: gandi_86@mail.ru;

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби

Золотосодержащая руда Акбакайского месторождения добывается как открытым способом – в карьере, так и подземным – в шахте, где содержание драгоценного металла в руде обычно повыше. Хвостохранилище это комплекс специальных сооружений и оборудования, предназначенный для хранения или захоронения радиоактивных, токсичных и других отвальных отходов обогащения полезных ископаемых, именуемых хвостами. На горно-обогатительных комбинатах (ГОК) из поступающей добытой руды получают концентрат, а отходы переработки перемещают в хвостохранилище. Цель данного исследования состояла в том, чтобы изучить биоокисление невосприимчивого, содержащего золото, пирротина, а также увеличить золотое восстановление во время последующего обычного цианирования. Бактериальные культуры, используемые в биологическом тесте, состояли в основном из рода *Thiobacillus*. Тесты проводились в лабораторном масштабе. Золотое содержание рудного образца, имело 10 г т⁻¹ Au. После 24 h выщелачиваемого времени прямым цианированием было получено (20%-й Au) низкое восстановление золота, с высоким потреблением реагента. Биовыщелачивание – процесс, который использовался в прошлом в минеральной предобработке невосприимчивых сульфидов, главным образом в золоте. Эта технология была доказана, чтобы быть более дешевой, более эффективной и безвредной для окружающей среды, чем жаренье и влажность высокого давления, нагревающие процессы. Пока наиболее изученный микроорганизм в биовыщелачивании – *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Есть несколько исследований о выгоде металлов низкой ценности через биовыщелачивание. В информации, связанных с ними, почти нет никаких исследований, имеющих дело со сложными полезными ископаемыми, содержащими арсенипирит (FeAsS). Сокращение и/или устранение мышьяка в этих рудах увеличивает их ценность, и позволяет эксплуатацию обширного разнообразия полезных ископаемых, которые сегодня являются подэксплуатируемыми.

Ключевые слова: золота, хвостохранилище, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, бактерия, рудник

DEEP EXTRACT GOLD FROM THE TAILINGS OF DEPOSITION AKBAKAI CULTURE ACIDITIOBACILLUS FERROOXIDANS

¹Kanaev A.T., ¹Kanaeva Z.K., ¹Myrzhanova I.A., ¹Urazbekova G.E.,
²Satybaldieva G.K., ¹Musaev K.L.

¹Kazakh National Pedagogical University named after Abai, Almaty, e-mail: gandi_86@mail.ru;

²Kazakh National University named after Al-Farabi

Gold ore deposits mined as Akbakayskogo surface – in a career, and underground nym – in the mine, where the precious metal in the ore is usually higher. Tailing a set of special facilities and equipment, intended for storage or disposal of radioactive, toxic waste dump and other mineral processing, called tailings. On Mining and Processing Plant (GOK) from entering a concentrate the ore mined, and waste processing is moved to the TMF. The purpose of this study was to examine the bio-oxidation insensitiveness-tibility, containing gold, pyrrhotite, and increase gold recovery during subsequent conventional cyanidation. Bacterial cultures used in the biological test, consisted mainly of the genus *Thiobacillus*. The tests were conducted in the laboratory scale. The gold content of the ore sample was 10 g t⁻¹ Au. After 24 h the direct cyanidation leaching time was obtained (20% Au) gold recovery is low, with high consumption of the reagent. Bioleaching – the process that was used in the past in the pre-processing refractory mineral sulphides, mainly in gold. This technology has been proven to be cheaper, more efficient and environmentally friendly than roasting and humidity of the high pressure, the heating processes. While the best-studied microorganism in bioleaching – *Acidithiobacillus ferrooxidans*. There are several studies on the benefits of low metal values through bioleaching. In the information associated with them, there is little research dealing with complex minerals containing arsenopyrite (FeAsS). Reduction and / or elimination of arsenic in these ores increases their value and allows up a vast variety of minerals that are now podekspluatiruemymi.

Keywords: gold, tailing, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, a bacterium mine

В настоящее время степень извлечения золота из флотоконцентратов руд Акбакайского месторождения не превышает 50% и от 7 до 20 г/т золота остается в хвостохранилищах цианирования. До 80% золота в них присутствует в виде тончайших вкраплений в зернах сульфидных минералов и не поддается цианированию [1].

Из рудника руда идет на обогатительную фабрику. На дробильном комплексе оно измельчается и поступает в бункеры мельниц, их пять. Здесь руда делится на крупную и мелкую фракции. Затем наступает процесс обогащения, он ведется на специальных столах. В итоге получают гравитационный и флотационный концентраты.

Последний рабочий процесс – флотация, после чего флотоконцентрат направляется на Балхашский горно-металлургический комбинат для выплавки золота.

Целью исследования являлось бактериально-химический метод выщелачивания золотосодержащих хвостов обогащения с последующим применением способа цианирования для достижения глубокого доизвлечения золота.

Материалы и методы исследований

В работе применяли лабораторные штаммы бактерии *Aciditobacillus ferrooxidans*, адаптированные к высоким концентрациям цветных металлов, мышьяка и серной кислоты в растворе.

Культуру бактерий *Acid.ferrooxidans* выращивали на среде 9К Сильвермана и Лундгрена следующего состава (г/л): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 2,0; K_2HPO_4 – 1,0; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5; NaCl – 0,2; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 44,2; pH среды доводили до 1,0 с H_2SO_4 . О развитии бактерий *Acid.ferrooxidans* судили по появлению бурой окраски

среды, вызванной образованием трехвалентного железа в бактериальном растворе [2]. Определение Fe^{+2} и Fe^{+3} проводилось объемным трилометрическим методом [3].

Результаты исследований и их обсуждение

В Акбакайском золотоносном месторождении хвостохранилище обогатительной фабрики представлены в двух видах – залежалые и свежие. Для проведения исследований были использованы хвостохранилище после цианирования, химический состав которых представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, в составе залежавшегося хвоста обогащения в достаточно большом количестве серебро Ag – 17,3 г/т, вместе с тем, содержание золота составляет Au – 7,6 г/т. Тогда как в свежем хвосте этот показатель противоположно, т.е содержание золота составляет Au – 18,0 г/т, количество серебра Ag – 5,4 г/т.

Таблица 1

Химический состав хвостов цианирования завода Доре

Вид материала	Содержание, г/т		Содержание, %								
	Au	Ag	As	Sb	Fe	S _{общ.}	S _{сульф.}	Cu	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Хвосты залежавшиеся	7,6	17,3	2,18	0,31	7,13	4,86	4,55	0,05	4,02	14,15	53,6
Хвосты свежие	18,0	5,4	2,49	0,03	6,93	7,24	5,54	–	–	–	–

Также в составе залежавшегося хвоста обогащения встречаются As, Sb, Fe, S_{общ.}, S_{сульф.}, Cu, CaO, Al₂O₃, SiO₂ в различных количествах, данные которого указаны в табл. 1. Свежие хвосты от залежавшегося отличается тем, что в составе первого не обнаружили Cu, CaO, Al₂O₃, SiO₂. Вместе с тем отметим, что содержание окиси кремния составляет до SiO₂ – 53,6%. Это означает, что золото содержится во взаимосвязанной форме с окисью кремния.

Для проведения эксперимента по бактериальному выщелачиванию хвостов отвала необходимо иметь в наличии активных культур *A.ferrooxidans*, адаптированная к производственным условиям Акбакайского ГОК. В связи с этим, для выращивания *A.ferrooxidans* использовали ингредиенты сред Сильвермана и Лундгрена (9К) приближенные к условиям производства. Для этого использовали вод с источника Бескемпир и Акбакайского месторождения. Кислотность среды подводили до pH 1,5 серной кислотой. Основной состав среды добавляли из расчета: FeSO_4 – 3,0 г/л, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0,5 г/л, MgSO_4 – 0,5 г/л и K_2HPO_4 – 0,5 г/л. Для аэрации бактериальной среды использовали атмосферный воздух, которого пода-

вали компрессором из расчета 1 объем воздуха на 1 объем среды в час.

Культивирование проводили периодическим способом, т.е. *A.ferrooxidans* выращивали на несменяемой среде от инокуляции до окончания роста клеток вследствие исчерпания питательных субстратов.

Как видно из рис. 1, в варианте эксперимента, где среда 9К, приготовленный шахтной водой Акбакай, окисление железа Fe (II) не происходит. Тогда как, в среде 9К, приготовленного в воде Бескемпир бактериальное окисление железа протекает интенсивно. Динамика окисление железа Fe (II) завершается на четвертые сутки. Необходимо отметить, шахтная вода месторождения Акбакай по своему химическому и физическому составу непригодна для питья. В связи с этим, питьевую воду для поселка Акбакай поставляет водоводом из водоисточника Бескеапир, которая расположена в нескольких километрах.

Таким образом, на основе полученных данных выяснили, что для выщелачивания золота из руд и продуктов их обогащения Акбакайского ГОК считаем, необходимым использовать воду из источника Бескемпир.

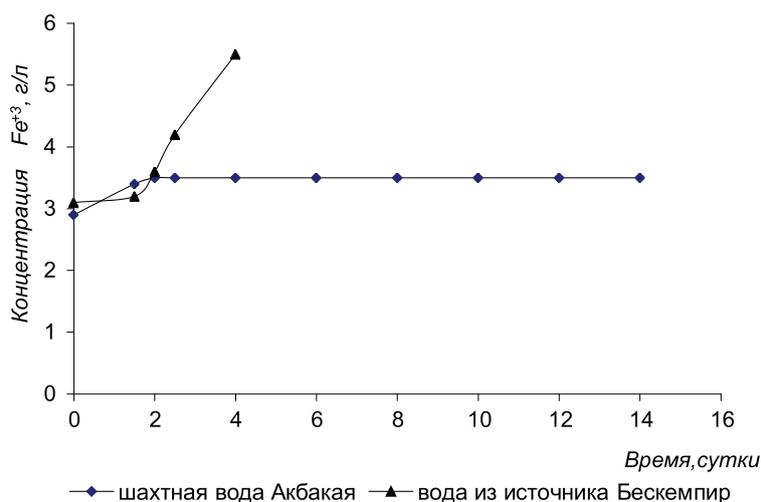


Рис. 1. Динамика окисления Fe (II) культурой *A. ferrooxidans* в зависимости от различия источников воды

Хвосты обогащения можно наблюдать на предприятиях по добычи металлов (Горно-обогатительные комбинаты). При добыче руды предприятие оставляет руду для переработки с определенным содержанием интересующего металла, а то, что не проходит по кондициям отправляется в «хвосты».

Как правило, ГОК строится с расчетом работы не менее 50 лет, и за это время в «хвостах» накапливается достаточное количество некондиционной руды. Так же может быть вариант, что под воздействием окружающей среды, в «хвостах» произошло вымывание ценного компонента, но например, в нижней части этих отвалов, произошло его накопление (барьер). Таким образом, в какой-то части «хвостов» скопился ценный компонент и теперь его можно извлечь.

Но обычно для извлечения ценного компонента из «хвостов» необходима другая технология, отличающаяся от основной, которая используется на ГОКе.

Пробы залежавшегося и свежего хвостов завода Доре Акбакайского ГОК представлены с содержанием 2,18 и 2,49% мышьяка, 0,03 и 0,3% сурьмы, 7,6 и 13,62 г/т Au соответственно (табл. 1). Мышьяк в пробах представлен в виде арсенопирита, сурьма – антимонитом, а железо – арсенопиритом и пиритом.

Для проведения лабораторного исследования отобрали пробу в количестве 100 г залежавшего хвоста, содержащего 7,6 г/т Au 2,18% мышьяка (табл. 1). Предварительно пробу промывали раствором 1,0% серной кислотой, объемом 0,5 л в течение одного часа.

После процесса фильтрации, твердый остаток кек подвергался к бактериально-химическому способу выщелачивания с целью удаления мышьяка с его состава. Процесс проходил с бактериальным раствором в объеме 500 мл с продолжительностью 4,0 суток.

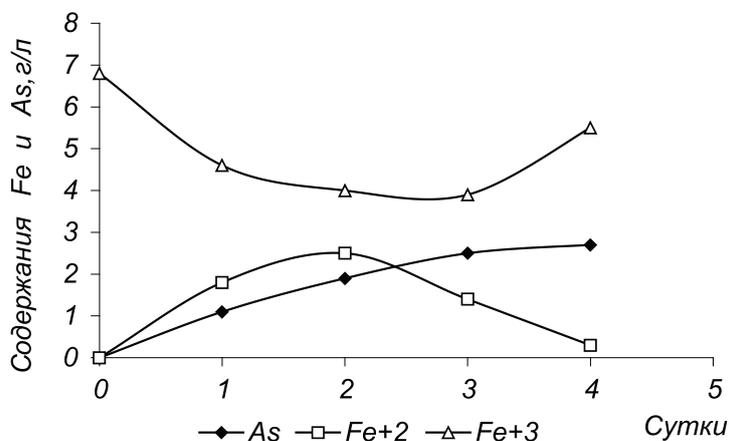


Рис. 2. Динамика изменения концентрации железа и извлечение мышьяка при бактериальном выщелачивании залежавших хвостов (Au – 7,6 г/т)

Как видно из рис. 2, процесс активного восстановления железа Fe(III) проходит в первые сутки. Исходное содержание железа, которое составляет всего 6,8 г/л, через час снижается до 4,8 г/л. Начиная со второй сутки, наблюдается его замедление, т.е. на третью сутки содержание Fe(III) снижается всего до 4,0 г/л. Соответственно в первые трое суток мышьяк активно переходит в раствор, его максимальное количество (2,5 г/л) достигает на третьей сутки.

Следующим этапом работы являлся глубокое извлечение золота методом цианирования из кека после бактериального вскрытия мышьяка. Опыты проводили при соотношении тяжелого к жидкому Т:Ж = 1:5 с продолжительностью агитации 24 часа на качалке с оборотом 180 об/мин. В качестве контрольного варианта опыта брали исходную пробу залежавших хвостов обогащения не подвергший к бактериальной обработке. В качестве растворителей использовали NaOH – 0,4% и NaCN – 0,1%.

Таблица 2

Извлечение золота из кека бактериального выщелачивания хвостов (Au-7.6 г/т)

Варианты	Т : Ж	Продолжительность агитации (час)	Растворители, %		Извлечение Au		
			NaOH	NaCN	мг/л	мг	%
Хвосты исходные(контроль)	1:5	24	0,4	0,1	0,46	0,23	30,2
Хвосты после бактериального вскрытия	1:5	24	0,4	0,1	1,40	0,70	92,1

Как видно из табл. 2, в варианте опыта с исходной пробой (контрольный вариант) при выщелачивании 0,4% растворителем NaOH переход в раствор золота составляет 30,2%. Тогда как, при выщелачивании кека с 0,1% раствором NaCN после бактериального вскрытия, извлечение золота составляет 92,1%.

Таким образом, сравнительные результаты извлечения золота цианированием

показали, что золото из кека после бактериальной обработки переход в раствор составляет на 61,9% больше, чем в контрольном варианте.

Следующий вариант исследования проводили со свежими хвостами, отобранные из пульпопровода завода, где твердый материал содержал в количестве 13,62 г/т Au, 2,49% мышьяка и 0,03% сурьмы. Продолжительность опыта составлял шесть суток.

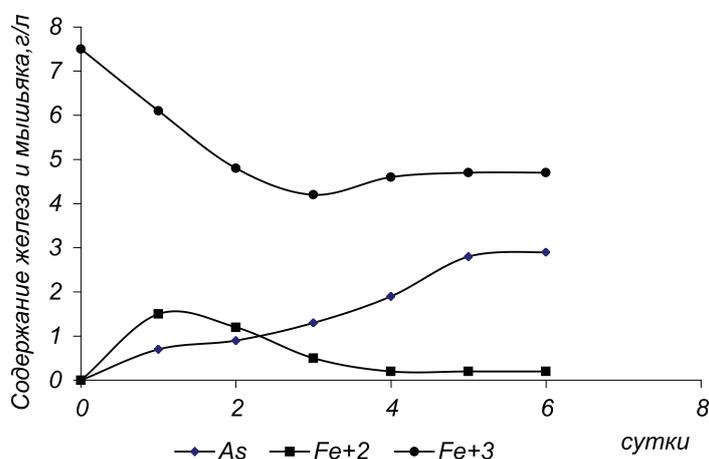


Рис. 3. Динамика изменения концентрации железа и извлечение мышьяка при бактериальном выщелачивании свежих хвостов (Au – 13,62 г/т)

Как видно из рис. 3, при шестисуточной бактериальной обработке в течение трое суток концентрация железа Fe(III) снижается от 7,5 до 4,5 г/л. При этом, переход мышьяка в раствор составляет 2,9 г/л. Как известно, при в кислой выщелачивающей среде пентавалентный мышьяк связывается с ионами Fe⁺³ и выпадает в осадок в виде FeAsO₄.

В следующем варианте опыта изучали глубокое извлечение золота из кека хвостов после бактериального выщелачивания. Для проведения эксперимента отобрали пробы из расчета Т:Ж = 1:5, продолжительность опыта составлял 24 часа. В качестве растворителей использовали 0,5% NaOH и 0,2% NaCN.

Таблица 3

Извлечение золота из кека хвостов цианированием после бактериального выщелачивания

Варианты	Т:Ж	Продолжи- тельность, ч	Состав растворителя, %		Извлечение Au		
			NaOH	NaCN	мг/л	мг	%
Хвосты исходные (контроль)	1:5	24	0,5	0,2	0,84	0,42	32,3
Хвосты после бактериального вскрытия	1:5	24	0,5	0,2	2,47	1,23	95,0

Таблица 4

Бактериальному выщелачиванию золотосодержащих хвостов перед цианированием (Au – 18 г/т)

Время выщела- чивания	Т, °С	рН	Колич. <i>A.ferrooxidans</i> , кл/мл	Содержание железа, г/л			Извлечение мышьяка			Извлечение сурьмы		
				Fe ⁺³	Fe ⁺²	Fe ^{общ}	мг/л	мг	%	мг/л	мг	%
1	10	2,5	10 ⁸	6,2	Сл	6,2	–	–	–	–	–	–
2	10	2,5	10 ⁸	5,7	Сл	5,7	505,0	–	–	2,42	–	–
3	11	2,5	–	5,0	0,7	5,7	1047,5	–	–	1,7	–	–
4	23	2,5	10 ⁷	4,6	0,3	4,9	–	–	–	1,47	–	–
5	25	2,5	10 ⁸	4,6	Сл	4,9	305,6	–	–	1,75	–	–
6	27	2,5	–	5,1	0	5,1	–	–	–	1,98	–	–
7	25	2,5	10 ⁸	5,0	0	5,0	2850,8	42760	57,3	2,2	33,0	3,66

Как видно из табл. 3, в растворах выщелачивания наблюдаем плавное снижение концентрации Fe⁺³ и As⁺⁵, извлечение мышьяка в раствор составило As⁺⁵ – 56,2%. При этом и степень извлечения золота составила в количестве Au – 95%, а в контрольном варианте Au – 32,3%.

Результаты цианирования исследуемого кека подтвердили выводы предыдущих опытов, что в варианте опыта после процедуры бактериального выщелачивания способом цианирования больше извлекается в раствор золота против контрольного варианта.

На основе данных полученного при постановке лабораторного исследования, проводили укрупненный эксперимент. Для проведения опыта использовали емкость объемом на 20 л с агитатором в виде про-

пеллера (табл. 5). Отобрали хвосты обогащения в количестве 3,0 кг и промывали 1,0% раствором серной кислоты. Общее количество расхода кислоты для промывания составлял – 15,0 л. После фильтрации в исследуемом твердом материале золото составлял Ag – 18,0 г/т. Процесс выщелачивания проводили с бактериальным раствором объемом 15 л, приготовленного на основе воды Бескемпир.

Содержание железа в бактериальном растворе составлял Fe⁺³ – 6,2 г/л, количество *A. ferrooxidans* – 10⁸ кл/мл. В течение семи суточного выщелачивания в растворе Fe⁺² железо окисляется до Fe⁺³ и в раствор переходит 42,7 г мышьяка, т.е. извлечение его составляет 57,3%. Извлечение сурьмы незначительно – всего 3,66%.

Таблица 5

Извлечение золота из кека укрупненного опыта (Au – 18 г/т; Ag – 5,4 г/т)

Кек, г	Т: Ж	Продолжительность, ч	Растворители, %		Извлечение золота			Извлечение серебра		
			NaOH	NaCN	мг/л	мг	%	мг/л	мг	%
100	1:5	24	0,4	0,3	3,27	1,635	90,8	0,88	0,44	81,4

Результаты цианирования кека укрупненного опыта (табл. 5) показали, что бактериальное вскрытие золота способствует увеличения степень извлечения до 90%, а извлечение серебра 81,4%.

Результаты атомно-адсорбционных анализов также подтвердили преимуще-

ство применение бактериальной обработки твердого материала. В контрольном варианте извлечение золота составляло всего 19–22%, а в вариантах, где кек обрабатывали культурой бактерии *A. ferrooxidans* извлечение золота на 60% больше, т.е. более 82% (табл. 6 и рис. 4).

Таблица 6

Сравнительные результаты глубокого извлечения золота из кека методом цианирования после бактериального выщелачивания мышьяка

Варианты	Au в исх., г/т	Извлечения Au по раствору			Извлечение Au по твердому		
		мг/л	мг	%	до, г/т	после, г/т	степень извлеч., %
Хвосты исходные (контроль)	7,60	0,46	0,23	30,2	7,6	5,92	22,1
Хвосты после бактериального вскрытия	7,60	1,40	0,70	92,1	7,6	1,32	82,7
Хвосты исходные (контроль)	13,62	0,84	0,42	32,3	13,62	12	19,1
Хвосты после бактериального вскрытия	13,62	2,47	1,235	95,0	13,62	2,47	80,0
Хвосты после бактериального вскрытия (укрупненный опыт)	18,0	3,27	1,635	90,8	18,0	3,33	81,5

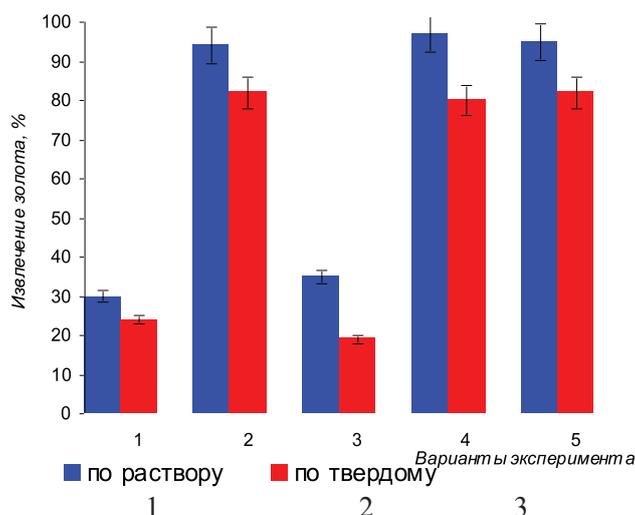


Рис. 4. Степень извлечения золота при цианировании:
1, 2 – лабораторные опыты; 3 – крупный опыт; 1, 3 – контрольные варианты (без бактериальной обработки); 2, 4, 5 – опытные варианты (после бактериальной обработки)

Таким образом, химический состав шахтной воды Акбакайского рудника отрицательно действует на рост и развития культуры *A. ferrooxidans*. Вода водоисточника Бескемпир благоприятно влияет на жизнедеятельность бактерий *A. ferrooxidans*, что ее можно применять в технологических процессах связанных с окислительной способностью бактерий *A. ferrooxidans*.

При бактериальном выщелачивании хвостов степень извлечения мышьяка в раствор составляет 50–68%. В дальнейшем увеличении pH среды до 2,0 количество извлеченного мышьяка от 15 до 30% выпадает в осадок в виде FeAsO_4 . Поэтому, после завершения опыта во всех проведенных

опытах наблюдается процесс снижения количества Fe^{+3} .

После бактериальной обработки кека степень извлечения золота методом цианирования составляет 90–95% (по раствору), 80–82,7% (по твердому) и этот показатель на 60–65% больше чем в контрольном опыте.

Список литературы

1. Турганов И.С. Разработка эффективной экологически щадящей технологии выщелачивания золота из минерального сырья для регионов с суровым климатом // Тех. поддержка. – 2007. – Vol. 961, № 8. – С. 49–37.
2. Немодрук А.А. Аналитическая химия мышьяка. – 1976. – С. 244.
3. Полькин С.И., Адамов Э.В., Панин В.В. Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. – М., 1982. – С. 288.