

УДК 575.1:622.342 (5752) (04)

Иманакунов Бейшен Иманакунович

д.х.н., академик НАН КР

Институт Химии и Фитотехнологий НАН КР

Иманакунов Бейшен Иманакунович

х.и.д., КРнын УИАнын академиги

КРнын УИАнын Химия жана фитотехнология институту

Imanakunov Beishen Imanakunovich

doctor of chemical sciences, academician,

Institute of Chemistry and Phytotechnology of the NAS KR

Шаршенова Жаркын,

к.х.н., Институт Химии и Фитотехнологий НАН КР

Шаршенова Жаркын,

х.и.к., КР УИАнын Химия жана фитотехнология институту

Sharshenova Zharkyn,

senior scientific researcher, Ph.D.

Institute of Chemistry and Phytotechnology NAS KR

Алтыбаева Дильбар Тойчуевна,

д.х.н. профессор, Ошский государственный университет

Алтыбаева Дильбар Тойчуевна,

х.и.д., профессор

Ош мамлекеттик университети

Altybaeva Dilbar Toychuevna,

doctor of chemical sciences, professor Osh State University

Айдарбеков Зарипбек Шарипович,

к.т.н., доцент,

Ошский государственный университет

Айдарбеков Зарипбек Шарипович,

т.и.к., доцент,

Ош мамлекеттик университети

Aidarbekov Zaripbek Sharipovich,

candidate of technical sciences, associate professor,

Osh State University

БИОТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ УПОРНЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД КЫРГЫЗСТАНА

Аннотация. В статье представлены экспериментальные данные по биокислению/биовыщелачиванию сульфидного концентрата ЗИФ «Кумтор» адаптированной культурой *Acidithiobacillus ferroxidans*. Результаты могут использоваться при разработке биотехнологии извлечения золота месторождений Кыргызстана.

Ключевые слова: концентрат, золото, сульфид, пирит, биологическое окисление, биологическое выщелачивание, микроорганизмы.

КЫРГЫЗСТАНДЫН ТУРУКТУУ СУЛЬФИДДИК РУДАЛАРЫНАН МЕТАЛЛДАРДЫ БӨЛҮП АЛУУ БИОТЕХНОЛОГИЯСЫ

Аннотация. Аталган макалада *Acidithiobacillus ferroxidans* адаптацияланган культурасынын ЗИФ «Кумтор» сульфиддик концентратын биокычкылдандыруу/биощелочтоо боюнча эксперименталдык маалыматтар берилди. Алынган жыйынтыктарды Кыргызстандын кен байлыктарынан алтынды бөлүп алууга болот.

Негизги сөздөр: концентрат, алтын, сульфид, пирит, биологиялык кычкылдандыруу, биологиялык щелочтоо, микроорганизмдер.

BIOTECHNOLOGY OF THE EXTRACTION OF METALS FROM PERSISTENT SULFIDE ORES OF KYRGYZSTAN

Abstract. The article presents experimental data on bio-oxidation/bio-leaching of sulfide concentrate of the Kumtor gold mining plant with an adapted culture of *Acidithiobacillus ferroxidans*. The results can be used in the development of biotechnology for extracting gold from deposits in Kyrgyzstan

Key words: concentrate, gold, sulfide, pyrite, biological oxidation, biological leaching, microorganisms.

В течение последних лет биовыщелачивание сульфидов металлов получило широкое развитие. Извлечение ценных компонентов из минералов с помощью микроорганизмов служит на сегодняшний день, признанным биотехнологическим способом переработки сульфидных руд [8,9]. Эта технология является экономически выгодной и экологически безопасной.

Все золотоносные руды Кыргызстана являются упорными. В мировых масштабах, переработка упорных золотоносных руд, показывает эффективность биовыщелачивания [2,3]. На месторождении «Кумтор» основная часть золота (80-85%) связана с пиритом и находится в полностью раскрытом (15-20%), частично раскрытом (50%) состояниях. Но примерно 20% золота находится в тонкодисперсном пирите, что обуславливает упорность руды.

Поэтому требуется тонкое измельчение руды для вскрытия частиц золота. Однако подвергать всю массу руды сверхтонкому измельчению для вскрытия тонкодисперсного золота оказывается технически трудоемким и экономически затратным.

Детальное понимание и исследование механизма биовыщелачивания является решающим для внедрения и успешного развития биотехнологии в Кыргызстане.

Обычно использование микроорганизмов при извлечении металлов преследует одну из двух целей:

- 1) окисление нерастворимых сульфидов металлов в растворимые сульфаты,
- 2) создание условий для лучшего извлечения целевого металла.

Обычно при биоокислении сульфидных минералов из упорной руды, выщелачивается железо, медь и сера. Это приводит к частичной раскрываемости или полной раскрываемости тонкодисперсного золота, заключенного в пирите (сульфидном минерале). Целью исследования являлось изучение биоокисления и механизма биовыщелачивания в лабораторных условиях.

Методы исследования

Для изучения биоокисления использовался концентрат СС-2 ЗИФ «Кумтор», измельченный в шаровой мельнице до крупности частиц 200 меш. Контроль измельчения осуществлялся с помощью ситового анализа. Навески концентрата были отобраны методом квартования [4].

Эксперименты проводили в колбах Эрленмейера V=500 мл, при температуре 28°C в термостате с периодическим перемешиванием пульпы. Плотность пульпы в опыте и контроле была (Т:Ж) =1:25. В опыте была добавлена ацидофильная адаптированная культура бактерии *Acidithiobacillus ferro-*

oxidans (*A.ferrooxidans*) в кислой среде 9К без добавления сульфата железа, рН пульпы 1,15-2,15.

Подсчет клеток бактерий (*A.ferrooxidans*) производился в камере Горяева при помощи фазово-контрастного устройства микроскопа фирмы «ЛОМО» (Россия). Пульпа периодически перемешивалась перед взятием пробы. Отделение фаз осуществлялось фильтрованием пульпы через бумажный фильтр, жидкая фаза использовалась на анализы, а твердая часть возвращалась в опытную колбу. О процессе биоокисления судили по изменению количества железа (Fe^{+2} и Fe^{+3}) и рН в жидкой фазе. Определение железа Fe^{+2} перманганатометрическим методом [5] а [Fe] комплексометрическим методом [6]. Измерение рН проводили по методике [1].

Анализ на содержание золота проводился пробирным методом атомно-абсорбционным методом на спектрометре S2 Thermo. Твердая фаза с фильтром предварительно обжигалась при температуре 800°C.

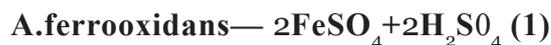
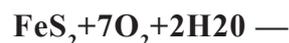
Схема эксперимента

Варианты	Опыты
Контроль	Концентрат СС -2 + Среда 9К + ($H_2SO_4 + H_2O$)
Опыт	Концентрат СС-2 + Среда 9К + культура <i>A.ferrooxidans</i> + ($PI_2SO_4 + H_2O$)

Результаты и обсуждение

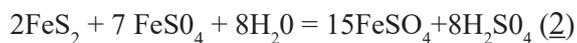
Анализируя полученные результаты можно отметить, что при рН (1,7-1,6) в интервале времени от 12 до 18 часов отмечалось наиболее интенсивное окисление в концентрате СС-2 ЗИФ «Кумтор» с микроорганизмом (*A.ferrooxidans*). Это возможно прямое бактериальное выщелачивание при физическом контакте с поверхностью минералов, здесь окисление осуществляется бактериями, которые закрепляются на поверхности пирита и принимают непосредственное участие в окислительном процессе, выполняя роль переносчика электронов от сульфида к кис-

лороду. Химизм протекающий при этом процессе описывается последующими реакциями:

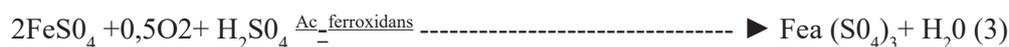


Очевидно, что бактерии должны находиться на поверхности минерала, но, исходя из литературных источников [7] бактерии прикрепляются не по всей поверхности минерала, а предпочитают специфические участки дефектов кристаллической решетки. Это подтверждают полученные экспериментальные данные, после 4х

суток, концентрация Fe^{2+} увеличивалась в 3,4 раза относительно исходного, концентрация железа Fe^{+3} уменьшилась до минимального, потому что происходит сопряженная реакция (2) и доминирующий процесс образования $FeSO_4$.



В кислых растворах процесс окисления сульфата закиси железа $FeSO_4$ до $Fe_2(SO_4)_3$ происходит по реакции (3)



Этот процесс показывает косвенную роль бактерий или не прямое биовыщелачивание. При косвенном выщелачивании бактерии не нуждаются в контакте с поверхностью минерала.

Результаты исследования представлены в таблице 1 и 2. Наблюдение проводились в начале по часам, а через сутки - по дням.

Таблица №1. Окисление концентрата СС-2 ЗИФ «Кумтор», микроорганизмом *A.ferrooxidans* в течение суток

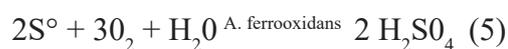
Варианты	Продолжительность (t)	pH	[Fe ⁺³] Мг/л*	
			[Fe ⁺²] 10 ²	[Fe ⁺³] 10 ²
Исходные концентрат + (H ₂ SO ₄ + H ₂ O)	Начало	1,4	2,09	3,19
А) Контроль	Через 6 часов	1,6	2,59	3,46
Б) Опыт		1,68	3,59	2,66
А) Контроль	Через 12 часов	1,6	2,60	3,48
Б) Опыт		1,7	5,98	2,98
А) Контроль	Через 18 часов	1,62	2,79	3,00
Б) Опыт		1,63	6,98	2,1
А) Контроль	Через 24 часов	1,69	2,72	2,94
Б) Опыт		1,64	7,1	2,05

A. ferrooxidans выполняет только каталитическую функцию и ускоряет окисление от Fe^{+2} до Fe^{+3} в растворе по уравнению (3).

В данном эксперименте концентрация железа $[Fe^{+3}]$ увеличивается относительно концентрации $[Fe^{+2}]$ и через 28 дней становится доминирующим. Образующийся сульфат $Fe_2(SO_4)_3$ является мощным химическим окислителем и может без участия бактерий взаимодействовать с сульфидом (пирит) и окисляет пирит до сульфата по реакции (4).



Fe^{+2} образующийся в данной реакции (4) может заново окислиться до Fe^{+3} микроорганизмом *A. ferrooxidans*. Выделяющаяся в процессе сера может быть окислена до серной кислоты. Окисление серы микроорганизмом происходит по следующей реакции (5)



Понижение pH в растворе от 2,25 до 1,15 объясняется образованием дополнительной серной кислотой H_2SO_4 по реакции (5).

Таблица № 2. Окисление концентрата СС-2 ЗИФ «Кумтор» культурой *A. ferrooxidans* в течение 40 суток

№	Варианты	Продолжительность (t)	pH	$[Fe^{+2}]$	$[Fe^{+3}]$
				Мг/л*10 ²	Мг/л*10 ²
1	1) Контроль	Через сутки	1,6	2,72	2,94
	2) Опыт		1,64	7,1	2,09
2	1) Контроль	Через 2 суток	1,64	2,8	2,54
	2) Опыт		1,7	7,07	3,05
3	1) Контроль	Через 4 суток	1,7	2,94	3,45
	2) Опыт		2,05	7,49	3,91
4	1) Контроль	Через 8 суток	1,74	2,98	3,99
	2) Опыт		2,25	7,8	3,5
5	1) Контроль	Через 10 суток	1,8	3,05	3,65
	2) Опыт		1,9	8,65	2,99
6	1) Контроль	Через 15 суток	1,8	3,29	3,81
	2) Опыт		1,5	8,91	2,98
7	1) Контроль	Через 22 суток	1,83	3,41	3,91
	2) Опыт		1,42	8,93	4,54
8	1) Контроль	Через 28 суток	1,85	3,40	3,85
	2) Опыт		1,28	9,59	10,01
9	1) Контроль	Через 33 суток	1,8	3,2	3,51
	2) Опыт		1,17	9,59	13,01
10	1) Контроль	Через 40 суток	1,92	2,81	3,8
	2) Опыт		1,15	13,77	22,96

В течении периода биоокисления концентрата производился подсчет бактерий *A.ferrooxidans* по указанной методике [10]. Произошло изменение титра клеток от $1,3 \cdot 10^7$ в начале опыта до $3,8 \cdot 10^9$ в кл. /мл в конце опыта.

Выводы

1) Адаптированные микроорганизмы *A.ferrooxidans* является эффективным биоокислителем концентрата СС-2 ЗИФ «Кумтор».

2) Механизм биовыщелачивания пирита в концентрате СС-2 ЗИФ «Кумтор» является двухступенчатым процессом.

А) Первая стадия - окисление происходит с помощью микроорганизма *A.ferrooxidans* контактирующего с поверхностью минерала (прямое окисление).

Б) На второй стадии основным фактором растворения сульфида (пирита) является косвенный механизм биовыщелачивания под действием Fe^{+1} , роль *A.ferrooxidans* сводится при этом к окислению в кислом растворе Fe^{+2} до Fe^{+3} (регенерация окислителя, косвенное или не прямое биоокисление).

Полученные результаты являются основой дальнейшей разработки биотехнологии извлечения золота из упорных руд ЗИФ Кыргызстана. Применение технологии биоокисления показывает, что оно является наиболее экономичным, эффективным и экологически безопасным способом переработки золотосодержащих руд, концентратов, отходов.

Литература

1. *Бейтис Р.* Определение рН. Теория и практика. Изд. Химия. 1972 - 397 С.
2. *Каравайко Г.И.* Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руды. Наука М.1972 - 288 С.
3. *Каравайко Г.И.* Микробиологический процесс выщелачивания металлов из руды. 1984 – 88 с.
4. *Каравайко Г.И. Росси Д.Ж и др.* Биотехнология металлов. Практическое руководство. М. Центр международных проектов Г.К.Н.Т. 1989г. - 375 С.
5. *Лурье Ю.Ю.* Аналитическая химия промышленных сточных вод. Изд. Химия. 1984г. – 427 с
6. *Файнберг С.Н.* Анализ руд и цветных металлов. Изд. .М. 1963 - 555 С.
7. *Bosecker K.* Bioleaching: metal solubilization by microorganism// FEMS microbiology / Rev.1997V.20 P.591 -604
8. *Norris P.R. Burton N.P. Fobs N.A.* Acidophiles in bioreactor mineral processing // Extremophiles.2000 V.4 p 71-76
9. *Rawlings D.E.* Characteristics and adaptability of iron and sulfur oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates // Microbial Cell Factories 2005. V.4 № 13DOI: 10.1186/1475-2859-4-3
10. *Шнота Е.Л., Савина Т.А* Изв. жур. НАН КР . 2012 №1 с. 62-65