

41,0 and Co – 0,74-3,4. At obtaining alloy with optimum composition, containing 10 % of nickel, extraction into it was, %: Ni – 89,4-99,0 and Fe – 21,6-49,0. The gotten results of laboratory tests are recommended for preparation of optimal slag composition and obtaining ferronickel at the stage of pilot testing and commercial development of the technology for processing OCNO of deposit Gornostayevskoe. For processing the poor by nickel OCNO it is very important to obtain optimal technological and technical and economic parameters, providing a low prime cost of nickel in the resulting ferronickel.

Key words: cobalt-nickel ore, ferronickel, slag, metallurgical coke, charge, nickel, cobalt.

Поступила 16.01.2015

УДК 669.21.053.4

Комплексное использование
минерального сырья № 1. 2015

А. К. КОЙЖАНОВА*, М. Б. ЕРДЕНОВА, Л. Л. ОСИПОВСКАЯ,
Д. Р. МАГОМЕДОВ, А. М. ДАРИШЕВА

АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения» АО «ННТХ «Парасат»,
Алматы, *aigul_koizhan@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНЫХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

Для извлечения благородных металлов из упорных руд была разработана биохимическая технология выщелачивания с использованием бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Проведены технологические исследования проб руды: определена удельная масса руды крупностью -2,5 мм; насыпная масса дробленой руды; выполнены ситовые анализы дробленой руды с распределением золота по классам крупности. Проведено агитационное выщелачивание дробленой руды крупностью -2,5 мм и измельченной руды крупностью класса -0,074 мм (90 %) по биохимической технологии извлечения золота из руды. Изучен химический и фазовый состав технологической пробы руды Бестобинского месторождения с использованием современных физико-химических методов анализа. Проба имеет силикатную основу, представленную кварцем, альбит-анортитовой смесью, мусковитом, каолинитом. Содержание золота в пробе 3 г/т. Определены оптимальные условия агитационного выщелачивания руды: температура 25-35 °С, соотношение Т:Ж=1:4, продолжительность выщелачивания 10 ч. Установлено, что силикатная основа остается без изменений. Количество цианидных комплексов золота и цветных металлов значительно снижается вследствие перехода их в раствор. Таким образом, бактерия *A. ferrooxidans* используется в эксперименте с целью предварительного разрушения сульфидов для более полного раскрытия золота и последующего цианидного выщелачивания. Результаты цианирования руды показали, что в оптимальных условиях эксперимента степень извлечения золота составляет 85 %. В то время как применение раствора хлорида натрия с последующим цианированием позволило за 10 ч извлечь примерно 70 % золота, а раствора сульфата железа (III) с последующим цианированием – примерно 45 % золота.

Ключевые слова: руда, агитационное выщелачивание, золото, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, извлечение, бактерии, биохимическое выщелачивание.

Введение. Постоянно увеличивающийся объем производства благородных металлов приводит к закономерному значительному истощению в недрах запасов богатых и легкообогащаемых руд и песков. В сфере производства в большей части используют руды: бедные по золоту, низкосортные упорные сульфидные, лежалые хвосты, старые отвалы, хвосты обогатительных фабрик. Казахстан обладает огромным потен-

циалом золотосодержащего минерального и техногенного сырья.

В мировой практике за последние десятилетия промышленное применение железо- и сероокисляющих микроорганизмов с целью извлечения ценных компонентов из руд в некоторых странах достигло широких масштабов. В настоящее время разными компаниями России, Австралии, стран Северной и Южной Америки и

Африки используются бактериально-химические технологии при добыче золота, меди, кобальта, никеля, цинка, урана [1-8].

Одной из главных проблем рудной золотодобычи являются «упорные» руды, содержащие тонковкрапленное в сульфидах золото и серебро. Технология биовыщелачивания основывается на окислительно-восстановительных реакциях, протекающих с участием ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, для которых рудные залежи, рудничные воды являются естественным местом обитания. Окисляя железо, серу и сульфиды, эти микроорганизмы участвуют в разрушении минералов. Благоприятной экологической нишей для жизнедеятельности многих специфических микроорганизмов являются рудные месторождения.

В АО «Казахалтын» входят Аксуский, Бестобинский, Жолымбетский рудники, разрабатываемые подземным способом месторождения золота: Аксу, Кварцитовые горы, Байлосты, Бестобе, Жолымбет. Добытые руды перерабатывались на соответствующих обогатительных фабриках по гравитационно-флотационной схеме с получением золото-серебросодержащих концентратов и шламов.

Руды месторождения Бестобе (АО «Казахалтын») относятся к золото-кварцевой и золото-сульфидно-кварцевой формации. Главными рудными минералами являются: пирит, арсенопирит, сурьмяный блеск; второстепенными: галенит, шеелит, сфалерит. Подавляющая часть золота и серебра представлена в форме природного сплава электрум. Методами рентгенофлуоресцентного анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии подтверждено присутствие золота и серебра в арсенопиритной руде месторождения Бестобе в форме природного сплава электрум, содержащего до 91 % золота и 10 % серебра. Пробность электрума по массе золота составляет 885 частей на тысячу, остальные 115 частей в основном приходятся на серебро. Другие халькофильные элементы – медь, железо, теллур, селен присутствуют в сотых долях процента.

При выборе направления исследований были учтены следующие факты. На многих действующих объектах по добыче цветных и благородных металлах наличие и роль спонтанных микроорганизмов мало изучены. В условиях кучного и подземного выщелачивания полезных компонентов из руды эти микроорганизмы адапти-

руются к среде и могут по-разному влиять на процессы извлечения металлов.

Известно, что на некоторых золотодобывающих предприятиях нашей республики степень извлечения золота из упорных золотосодержащих руд и продуктов их обогащения не превышает 60-70 % и значительное количество остается в хвостах. Поэтому для изучения роли микроорганизмов на различных участках кучного выщелачивания золота из руд и разработаны экономически рентабельные варианты бактериально-химического выщелачивания упорных золотомышьяковых руд, что создает основы для повышения степени извлечения золота на действующих объектах.

Известно, что микроорганизмы участка кучного выщелачивания золота влияют на процесс цианирования. В результате микробиологических исследований различных объектов кучного выщелачивания золота из карьерных руд Бестобинского месторождения были выделены некоторые группы микроорганизмов: тионовые (*Thiobacillus Thioparus*, *Thiobacillus thiooxydans*) и нитрификаторы (*Nitrosomonas*). Определены их участие и отрицательная роль в процессе извлечения золота способом цианирования. Бактериальное выщелачивание золото-мышьяковых руд повышает степень извлечения золота на 20-30 %.

Эффективность разработки определяется применением способа, останавливающего отрицательное влияние местных штаммов в процессе извлечения золота цианистым методом.

Экспериментальная часть. *Объект исследований* – золотосодержащая упорная полиметаллическая руда месторождения Бестобе.

Реагенты – щелочные растворы NaCN и сернокислые растворы ($H_2SO_4 - 2\%$), содержащие: NaCl, $Fe_2(SO_4)_3$, $Na_2S_2O_3$ в различных концентрациях, биомасса бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Методы анализа и аппаратура – спектральный, рентгенофазовый, ситовой, атомно-адсорбционный химический; ИК-Фурье спектрометр Avatar-370, дифрактометр D-8 Advance (BRUKER), излучение α -Cu, атомно-абсорбционный спектрометр AA240 FS Varian BV.

Методика проведения эксперимента. Опыты проводили при перемешивании со скоростью вращения механической мешалки – 250 об/мин., при соотношении Т:Ж=1:4, температуре 25-35 °C.

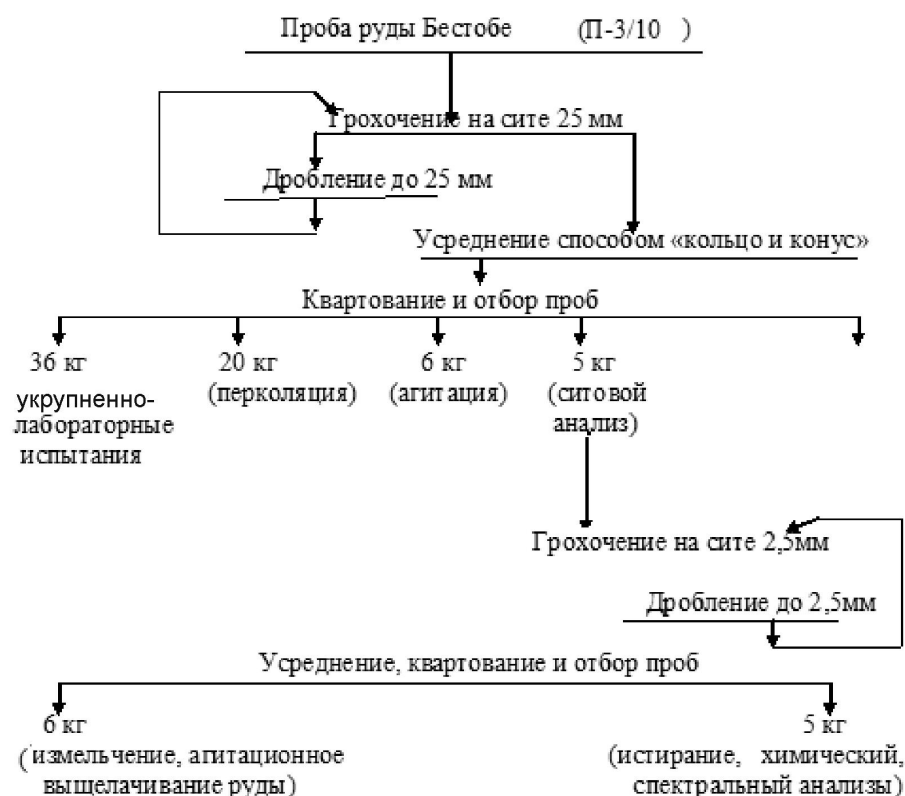


Рисунок 1 – Схема подготовки пробы руды месторождения Бестобе к исследованиям

Таблица 1 – Результаты спектрального анализа руды Бестобе

Содержание элементов, %										
Au	Ag	Cu	Fe	Zn	As	Si	Al	Na	Mg	
≥3 г/т	~0,001	>0,01	>3	перекр.	Na	>0,01	>1	много	много	>3

Температура поддерживалась при агитационном выщелачивании в термостатированных стаканах с помощью жидкостного циркуляционного термостата U2C.

Подготовка пробы руды к исследованиям. Подготовка представительной пробы руды месторождения Бестобе к исследованиям произведена в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1. Проба руды представлена кеновым материалом, извлеченным из скважины специальным видом бурения.

Прежде всего проведено дробление представительной пробы руды на щековой дробилке с размером щели 25 мм и грохочение на сите с диаметром отверстий 25 мм. Выделенный класс +25 мм (надрешетный продукт) додроблен до полного прохождения дробленой руды через сито 25 мм.

После этого подрешетный продукт (крупность -25 мм) тщательно усреднили способом «кольцо и конус», сквартовали и отобрали пробы.

Аналитические исследования. В ходе исследований выполнены следующие анализы исходной пробы руды: гравиметрический; спектральный полуколичественный и химический анализы на содержание основных компонентов.

Результаты химических и спектральных анализов.

В работе представлена проба руды следующего химического состава, мас. %: Cu 0,001; Zn 0,014; Ni 0,11; Co 0,075; Fe 3,7; As 0,45; Sb 0,078; MgO 0,8; C 1,52; S_{общ} 0,76; Si >1; Ag 1,5 г/т; Au – 3,0 г/т.

Проведены исследования по изучению руды и растворов методом ИК-спектроскопии до выщелачивания и после бактериальной обработки

и цианирования, которые свидетельствуют о переходе золота из руды в раствор.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты спектрального и минералогического анализов руды месторождения Бестобе.

Промышленно значимым компонентом в руде является только золото. Остальные компоненты представлены туфогенными песчаниками и алевролитами с прожилками кварца и кварц-кальцитового состава и сульфидной минерализацией.

Таблица 2 – Минералогический состав руды Бестобе

Минерал	Содержание минералов, %
Кварц	27,9
Полевой шпат	37,0
Кальцит	3,4
Пирит	1,6
Арсенопирит	14,9
Антимонит	0,08
Хлорит	8,0
Магнетит	17,4

Физические характеристики руды Бесто-бе. Испытания материала технологических проб обязательно включают измерение удельной и насыпной масс дробленой руды (отношение веса вещества к занимаемому им объему). Физические характеристики дробленой руды определяли по стандартным методикам. Результаты определения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Физические характеристики дробленой руды

Показатель	Единица измерения	Значение показателя
Удельная масса дробленой руды крупностью -2,5 мм	т/м ³	1,92
Влажность руды в поставленной пробе	%	1,0
Насыпная масса дробленой руды для класса:		
-25 мм	т/м ³	1,45
-10 мм	т/м ³	1,49
Угол естественного откоса руды для класса:		
-25 мм	градус	33
-10 мм	градус	34

Результаты ситового анализа после дробления и измельчения руды приведены в таблице 4.

С помощью рентгенофазового анализа подтверждены результаты минералогического анализа и других способов изучения природы поверхности руды и протекающих на ней превращений. На рисунке 2 представлен рентгенофазовый анализ исходной руды.

Необходимо отметить, что в золотосодержащей руде в породе замечен процесс появления новообразований си-

Таблица 4 – Результаты ситового анализа руды

Класс крупности, мм	Содержание, г	Содержание, %
-1 +0,5	430,0	43
-0,5 +0,25	400,0	40
-0,25 +0,1	110,0	10
-0,1	90,0	9

ликатных, алюмосиликатных и карбонатных форм, что является результатом частичной перекристаллизации минералов.

Результаты и их обсуждение. Были отработаны 5 вариантов выщелачивания руды разными способами в агитационном режиме, при соотношении Т:Ж=1:4, скорости перемешивания 250 об./мин, Т=25-35 °С. Для проведения экспериментов в качестве растворителей золота использовались NaCN (рН=10), NaCl, Fe₂(SO₄)₃, Na₂S₂O₃.

До начала выщелачивания руды во всех вариантах провели водную промывку серной кислотой (H₂SO₄ – 2 %) в течение 1 ч с целью извлечения кислоторастворимых компонентов, отрицательно влияющих на процесс извлечения золота. После удаления кислоторастворимых металлов кек промывали водой и выщелачивали (таблица 5) в вариантах 1, 2, 3 цианидным раствором, в варианте 4 – тиосульфатным раствором. В варианте 5 после кислотной промывки провели бактериальное вскрытие раствором *A. Ferrooxidans*, содержащим 5-6 г/дм³ Fe₃+, количество бактерий 106 кл/мл в течение 5 суток. После бактериального вскрытия сульфидов золото значительно легче извлекается цианированием и степень его извлечения после бактериального вскрытия составляет 85 %.

Растворы, полученные при водном выщелачивании упорной золотосодержащей руды, содержат примеси цветных металлов, железа и другие в количествах, соизмеримых или мень-

Таблица 5 – Результаты агитационного выщелачивания золота

Раствор	Продолжительность, ч	Содержание элементов, мг/дм ³				
		Au	Ag	Cu	Zn	Fe
1 вариант NaCN 1 г/дм ³	2	0,42	0,65	2,76	1,32	24,7
	7	0,45	0,19	3,01	1,68	25,9
	10	0,44	0,18	3,35	0,36	25,2
2 вариант NaCl 250 г/дм ³ , NaCN 1 г/дм ³	2	0,47	0,53	31,0	0,59	23,0
	7	0,52	0,63	38,6	0,56	23,6
	10	0,53	0,63	43,5	0,6	24,6
3 вариант Fe ₂ (SO ₄) ₃ 1,5 г/дм ³ , NaCN 1 г/дм ³	2	0,38	0,18	11,6	0,96	41,4
	7	0,41	0,19	29,9	1,4	38,8
	10	0,41	0,19	11,9	1,69	38,6
4 вариант Na ₂ S ₂ O ₃ 15,8 г/дм ³	2	0,19	0,04	2,23	0,10	0,56
	7	0,20	0,036	2,61	0,022	0,11
	10	0,22	0,037	2,85	0,031	0,11
5 вариант <i>A. ferrooxidans</i> , NaCN 1 г/дм ³	2	0,33	0,14	3,2	0,18	54,4
	7	0,50	0,14	4,62	0,10	45,4
	10	0,62	0,15	4,77	0,039	52,0

N 190

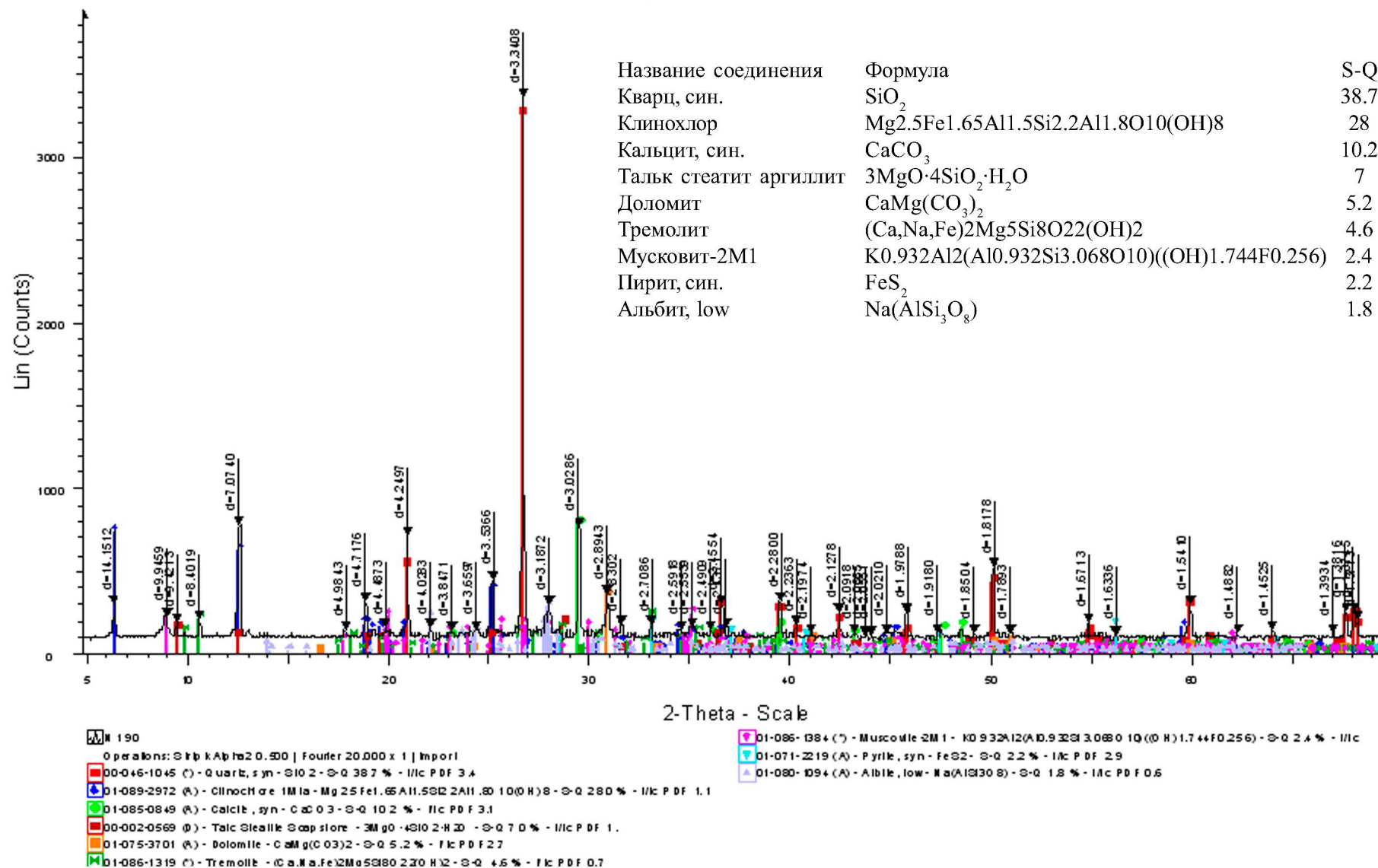


Рисунок 2 – Результаты рентгенофазового анализа исходной руды месторождения Бестобе

ших, чем концентрация золота (таблица 5). В наиболее заметных количествах в 5 варианте помимо железа содержатся в растворе серебро, медь и цинк (0,1-4,7 мг/дм³).

На рисунке 3 показан график степени извлечения золота с различными окислителями. Как видно из полученных данных, предварительное бактериальное выщелачивание увеличивает степень извлечения. Прямое цианирование руды дает 58,7 %-ное извлечение золота по раствору. Предварительное биовскрытие золота дает прирост 26,3 %, т. е. извлечение составляет 85 %. Применение раствора хлорида натрия с последующим цианированием позволило за 10 ч извлечь 70,7 % золота, а раствором сульфата железа (III) с последующим цианированием – 45,6 % золота.

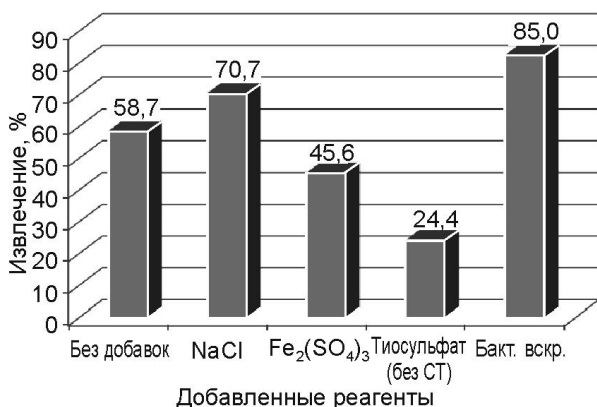


Рисунок 3 – Извлечение золота с различными реагентами при агитационном выщелачивании

На основании полученных данных для переработки упорных руд рекомендован метод агитационного выщелачивания. Наиболее эффективной и технологичной оказалась биохимическая технология выщелачивания упорной руды цианидным раствором, так как предварительное биоокисление руды увеличивает извлечение золота.

Выводы. Проведены аналитические и технологические исследования пробы руды Бес-тобинского месторождения с использованием современных физико-химических методов анализа.

По результатам химических анализов содержание золота в руде составляет 3 г/т, серебра 1,5 г/т. По результатам химических и спектральных анализов промышленно-ценное значение в руде представляет только золото. Содержание

остальных ценных металлов (серебро, медь, цинк) невелико и они промышленной ценности не представляют.

С целью предварительного разрушения сульфидов и более полного раскрытия золота при последующем цианидном выщелачивании в экспериментах использована биомасса бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Проведено агитационное цианидное выщелачивание золота из дробленной руды крупностью класса -0,074 мм. Представленные результаты отражают возможность использования бактерий, хлорида натрия, сульфата железа (III), тиосульфата и цианида натрия для выщелачивания руд. Исследования показали более высокую эффективность агитационного выщелачивания золота после обработки бактериальным раствором *A. ferrooxidans* с последующим цианированием в рекомендованном режиме выщелачивания. Высокое извлечение золота (85 %) достигнуто за 10 ч при температуре 25-35 °С, соотношении Т:Ж=1:4.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Масленицкий И.Н., Чугаев Л.В., Борбат В.Ф., Никитин М.В., Стрижко Л.С. *Металлургия благородных металлов*, изд. 2-е. – М.: Metallurgy, 1987. – 432 с.
- 2 Камалов М.Р. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1990. – 183 с.
- 3 Котляр Ю.А., Меретуков М.А., Стрижко Л.С. *Металлургия благородных металлов*. Кн. 1. – М.: МИСИС, 2005. – 431 с.
- 4 Дементьев В.Е., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е. Сопоставление вариантов цианирования CIP и RIP продуктов бактериального окисления золотосодержащих концентратов // *Цветные металлы*. – 2005. – № 2. – С. 18-19.
- 5 Каравайко Г.И. Микробиологические процессы выщелачивания. – М.: Наука, 1984. – 88 с.
- 6 Адамов Э.В. Чановый процесс бактериального выщелачивания // *Цветная металлургия*. – 1989. – № 8. – С. 11-14.
- 7 Rojas-Chapana I.A., Tributsch H. Biochemistry of sulfur extraction in biocorrosion of pyrite by *Thiobacillus ferrooxidans* // *Hydrometallurgy*. – 2001. – 59, № 2-3. – P. 291-300.
- 8 Накамото К. Инфракрасные спектры неорганических и координационных соединений. – М.: Мир, 1966. – 412 с.

REFERENCES

- 1 Maslenskij I.N., Chugayev L.V., Borbat V.F., Nikitin M.V., Strizhko L.S. *Metallurgiya blagorodnykh metalov, izdanie 2-e.* (Metallurgy of noble metals, Iss. 2). Moscow: Metallurgy, 1987. 432 (in Russ.).

2 Kamalov M.R. *Rol' mikroorganizmov v vyshchelachivaniy metallov iz rudy v Kazakhstane* (Role of microorganisms in leaching of metals from ores in Kazakhstan). Alma-Ata: Nauka, **1990**. 183 (in Russ.).

3 Kotlyar Yu.A., Meretukov M.A., Strizhko L.S. *Metallurgiya blagorodnykh metallov* (Metallurgy of noble metals). Book 1. Moscow: National University of Science and Technology MISIS, **2005**. 431 (in Russ.).

4 Dement'ev V.E., Gudkov S.S., Emel'yanov Yu.E. *Sopostavlenie variantov tsianirovaniya CIP i RIP produktov bakterial'nogo okisleniya zolotosoderzhashchikh kontsentratoov* (Comparison of cyanidation variants of CIP and RIP products of bacterial oxidation of gold-bearing concentrates). *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*. **2005**. 2, 18-19 (in Russ.).

5 Karavaiko G.I. *Mikrobiologicheskie protsessy vyshchelachivaniya* (Microbiological processes for leaching). Moscow: Nauka, **1984**. 88 (in Russ.).

6 Adamov Eh.V. *Chanovyy protsess bakterial'nogo vyshchelachivaniya* (Tank process of bacterial leaching). *Tsvetnaya metallurgiya = Non-ferrous metallurgy*. **1989**. 8. 11-14. (in Russ.).

7 Rojas-Chapana I.A., Tributsch H. *Biochemistry of sulfur extraction in biocorrosion of pyrite by Thiobacillus ferrooxidans*. *Hydrometallurgy*. **2001**. 59. 2-3 291-300 (in Eng.).

8 Nakamoto K. *Infrakrasnye spektry neorganicheskikh i koordinatsionnykh soedinenii* (Infrared spectra of inorganic and coordinating compounds). Moscow: Mir, **1966**. 412 (in Russ.).

ТҮЙІНДЕМЕ

Қиын өңделетін кендерден асыл металлдарды алу үшін *A.ferrooxidans* бактерияларын қолдану арқылы биохимиялық шаймалау технологиясы ұсынылды. Осыған орай кен сынамаларына мынандай зерттеулер жүргізілді: ірілігі 2,5 мм кендердің нақты меншікті массасы мен ұсақталынған кендердің төгілген массасы анықталды, алтынды ірілік классына қарай жіктеу мақсатында ұсақталған кендер елеуіштен өткізілді, ірілігі 2,5 мм дейін үгітілген кендерге және ірілігі (90 %) классқа жататын 0,074 мм дейін ұсақталған кен құрамынан алтынды биохимиялық технологиямен алу мақсатында үгітті шаймалау жұмыстары жүргізілді. Қазіргі заманның физико-химиялық талдау әдістерін қолдана отырып, Бестөбе кен орнынан алынған сынамалардың химиялық және фазалық құрамы зерттелді. Сынақ альбит-анортитті қоспасы, мусковит, каолинит және кварц түріндегі силикатты негізден тұрады. Сынақ құрамындағы алтын мөлшері 3 г/т тең. Кендерді үгітті шаймалаудың тиімді жағдайлары белгіленген: температура 25-35 °C, С:Қ=4:1, шаймалау ұзақтығы 10 сағат. Зерттеу жұмысы нәтижесінде силикат негізі өзгеріссіз қалып, алтын және түрлі түсті металлдар ерітіндіге өту себебіне байланысты олардың цианидті кешендерінің саны төмендегені анықталған. Тәжірибеде *Thiobacillus ferrooxidans* бактериялары алтынды толық ашуда кедергі болатын сульфидтерді алдын ала бұзу үшін және кейін цианидті шаймалау мақсатында қолданылған. Кендерді цианидтеу жұмыстары мынандай нәтижелер көрсеткен, яғни тәжірибе барысында алтын алу дәрежесі 85 % құраған. Натрий хлориді ерітіндісін қолдана отырып шаймалау үрдісі нәтижесінде 10 сағат ішінде 70 % алтын алуға мүмкіндік берді, ал темір (III) сульфаты ерітіндісін қолдана отырып шаймалау үрдісі нәтижесінде 45 % дейін ғана алтын алуға мүмкіндік берді.

Түйінді сөздер: кен, шаймалау, алтын, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, алу.

SUMMARY

Biochemical leaching technology with using bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* was developed for the recovery of precious metals from refractory ores. Technological research of ore samples was conducted: determination of the specific weight of the ore with particle size -2.5 mm; determination of bulk density of crushed ore; sieve analysis of crushed ore to distribute gold by size classes. Agitation leaching of crushed ore with particle size -2.5 mm and grinded ore with particle size -0.074 mm (90 %) was conducted by biochemical technology to extract gold from ore. The chemical and phase compositions of ore sample from Bestobe deposit were investigated by modern physicochemical methods of analysis. The sample has a silicate base, represented by quartz, albite-and-anorthite mixture, muscovite, kaolinite. The gold content in the sample is 3 g/t. The optimal conditions for ore agitation leaching: temperature 25-35 °C, the ratio S:L=1:4, leaching time 10 hours. It was found that silicate framework remains unchanged, the number of cyanide complexes of gold and non-ferrous metal is reduced significantly due to their transition into the solution. Thus, *A. ferrooxidans* bacteria are used in the experiment to pre-fracture of sulfides for better opening of gold and subsequent cyanide leaching. Results of ore cyanidation showed that in the optimal experimental conditions, the gold recovery is 85 %. Whereas use of sodium chloride solution with subsequent cyanidation allowed in 10 hours to recovery about 70 % of gold and using iron (III) sulfate solution followed by cyanidation – about 45 % of gold.

Key words: biochemical leaching, ore, gold, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, extraction, bacteria, agitation leaching.

Поступила 23.02.2015

