

BULLETIN OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSN 1991-3494

Volume 4, Number 362 (2016), 260 – 266

**STUDY OF PROCESS CYANIDE LEACH GOLD
FROM ORE AND GRAVITY CONCENTRATION
TAILINGS SULFIDE AND OXIDE ORES**

B. N. Surimbayev^{1,2}, A. O. Baikonurova¹, L. S. Bolotova², B. Mishra³

¹Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpaev, Almaty, Kazakhstan,

²The Branch of the Republican State Enterprise «National center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan» State scientific-industrial association of industrial ecology "Kazmekhanobr", Almaty, Kazakhstan,

³Worcester Polytechnic Institute, Boston, USA.

E-mail: surimbaev@gmail.com, a.baikonurova@yandex.kz, L_bolotova@yahoo.com

Key words: cyanidation, leaching, gravity concentration, combined methods of beneficiation, gold.

Abstract. This article describes the performance of the cyanide leaching process gold from the ore and gravity separation tailings of sulphide and oxide ores. Assay results are obtained, the chemical and mineralogical analysis of samples carried out tests on samples of gravity concentration with further cyanidation tailings gravity. We conducted tests on the original ore cyanidation and cyanidation tests on gravity tails. Compare the results of the cyanide leach of the original ore cyanide leaching of gold from tailings gravity separation of sulphide and oxide ores.

УДК 622.772

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЦИАНИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
ЗОЛОТА ИЗ РУДЫ И ХВОСТОВ ГРАВИТАЦИОННОГО
ОБОГАЩЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ И ОКИСЛЕННЫХ РУД**

Б. Н. Суримбаев^{1,2}, А. О. Байконурова¹, Л. С. Болотова², Б. Мишра³

¹Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,

²Филиал РГП «НЦ КПМС РК» Государственное научно-производственное объединение

промышленной экологии «Казмеханобр», Алматы, Казахстан,

³Вустерский политехнический институт, Бостон, США

Ключевые слова: цианирование, выщелачивание, гравитационное обогащение, комбинированные методы обогащения, золото.

Аннотация. Рассмотрены показатели процесса цианидного выщелачивания золота из руды и хвостов гравитационного обогащения сульфидных и окисленных руд. Получены результаты пробирного, химического и минералогического анализа проб, проведены тесты по гравитационному обогащению проб с дальнейшим цианированием хвостов гравитации. Проведены тесты по цианированию на исходной руде и тесты цианирования на хвостах гравитации. Сравнены результаты цианидного выщелачивания из исходной руды с цианидном выщелачиванием золота из хвостов гравитационного обогащения сульфидных и окисленных руд.

В последние годы происходит значительное увеличение добычи благородных металлов, в частности золота. Это связано с тем, что золото является основным банковским металлом и является валютным резервом многих стран. Особенно актуальным этот вопрос является из-за нестабильности конвертируемых мировых валют, падением цен на ценные бумаги и последствий мирового финансового кризиса.

Золото в природе встречается, в основном, в самородном состоянии, главным образом в виде мелких зерен, вкрапленных в кварц, или содержащихся в кварцевом песке. В небольших количествах золото присутствует в сульфидных рудах железа, свинца и меди. Кларк золота составляет $5 \cdot 10^{-7}$. За всю историю человечеством добыто около 161 тысячи тонн золота (оценка на 2011 год). Если сплавить все это золото воедино, получится куб со стороной примерно 20 м [1].

В настоящие времена 50 % выпускаемого золота используется в ювелирных изделиях, 40 % – в качестве инвестиции и остальные 10 % – в промышленности [2].

Мировой объем производства золота в 2014 году, согласно данным Metals Focus, составил 3133 тонн [3]. Крупнейшие страны-производители золота приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 – Двадцать ведущих золотодобывающих стран [3]

Место	Страна	Добыча, т	
		2013 г.	2014 г.
1	Китай	438,4	462,0
2	Австралия	268,1	272,4
3	Россия	248,5	266,2
4	США	230,1	210,8
5	Перу	182,4	171,0
6	ЮАР	179,5	167,9
7	Канада	124,7	151,3
8	Мексика	106,2	110,4
9	Гана	104,8	104,1
10	Бразилия	89,3	90,5
11	Индонезия	90,7	89,5
12	Узбекистан	81,0	85,0
13	Папуа-Новая Гвинея	67,5	67,2
14	Аргентина	51,2	60,0
15	Танзания	52,0	50,8
16	Казахстан	42,4	49,2
17	Мали	49,2	48,6
18	Чили	48,6	44,5
19	Колумбия	45,7	43,6
20	Филиппины	39,7	40,4
	Другие	520,9	547,7
	Всего в мире	3061	3133

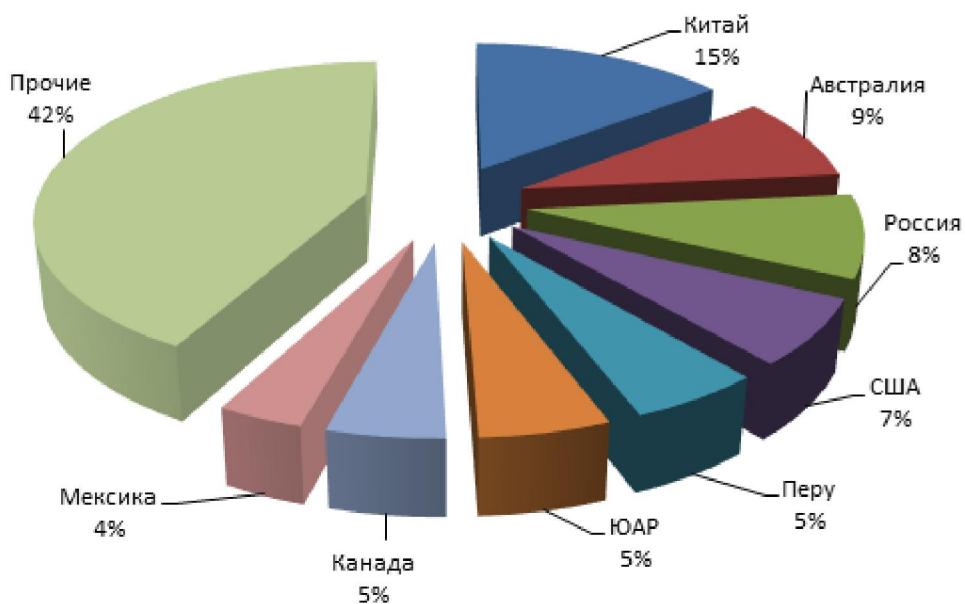


Рисунок 1 – Крупнейшие страны-производители золота

Казахстан находится на третьем месте по доказанным месторождениям золота среди стран СНГ после России и Узбекистана, а по добыче в мире – 16 место. По данным 2009 г. [4] ресурсы страны оцениваются в 1,8 тыс. т, запасы – около 800 т.

Золоторудные и золотосодержащие месторождения выявлены во всех регионах Республики Казахстан. По уровню запасов лидирующее положение занимают Восточный – около 52,2 % (Бакырчик, Сузdalское, Большевик, Васильевское, Риддер-Сокольное, Жанан, Акжал, Каскабулак), Северный (Васильковское, Варваринское, Узбой, Сымбат, Комаровское, Элеваторное, Аккаргинское, Жетыгординское) и Центральный Казахстан – 30 % (Аксу, Жолымбет, Бестюбе, Майкаин, Кварцитовые Горки, Енбекши, Пустынное), остальные 17,8 % – Южный (Акбакай, Алтынта, Дарабай, Аксакал-Бескемпир, Мынарал, Жаркулак, Карамурун, Архарлы, Кумысты) и Западный Казахстан (Юбилейное). Сыревая база золотодобывающей промышленности Казахстана представлена в основном мелкими (с запасами до 25 т золота) и средними (от 25 до 100 т золота) месторождениями. В стране насчитывается 122 коренных золоторудных, 81 комплексных и 34 россыпных месторождений [5, 6].

Известно, что самым распространенным процессом извлечения золота из бедных руд является цианирование. В основе этого процесса лежит селективное выщелачивание золота или другого благородного металла водными растворами цианидов натрия, калия или кальция. Полученный раствор, содержащий растворенное золото, отправляют на переработку различными методами для получения товарного продукта высокого качества в виде сплава Доре в слитках. Полученный сплав отправляют на аффинажный завод для производства золота необходимой степени чистоты [7, 8].

Представляло интерес изучить эффективность извлечения золота при цианидном выщелачивании хвостов гравитационного обогащения для двух разнохарактерных руд золотосодержащего месторождения: окисленных и первичных (сульфидных). Изучаемое нами месторождение золота делится на два участка (Южный и Северный), каждый из которых имеет окисленные и первичные (сульфидные) зоны: ТЮ-1 – характеризующая руду окисленного типа участка Южный; ТЮ-2 – характеризующая сульфидные руды участка Южный; ТС-1 – характеризующая руду окисленного типа участка Северный; ТС-2 – характеризующая сульфидные руды участка Северный [9].

Среднее содержание золота в изученных пробах по результатам пробирно-гравиметрического анализа составило: ТЮ-1 – 1,54 г/т; ТЮ-2 – 2,735 г/т; ТС-1 – 0,95 г/т; ТС-2 – 1,335 г/т [10].

Промышленно значимым компонентом во всех пробах является только золото. Во всех пробах содержание вредных примесей, как мышьяк и сурьма, невелико. Цветные металлы, вследствие их небольшого количества, не представляют промышленной ценности. В таблице 2 представлен минеральный состав проб.

Таблица 2 – Минеральный состав проб золотосодержащих руд

Минералы	Содержание, %			
	окисленные пробы		сульфидные пробы	
	ТЮ-1	ТС-1	ТЮ-2	ТС-2
Рудные минералы				
Гетит, лимонит	7,0	4,5	–	–
Магнетит, гематит	2,3	2,3	3,5-4,0	2,0
Пирит	Зн.	Зн.	2,5-3,0	1,0
Сфалерит	–	–	Зн.	Зн.
Галенит	–	–	Зн.	–
Пордообразующие минералы				
Монтмориллонит	48-49	44-45	–	–
Каолинит	25	30	–	–
Кварц	11-12	8-9	28-29	30,0
Амфибол	–	–	12-13	–
Хлорит	–	–	10	8
Альбит	–	4,0	14-15	14,0
Кальцит	–	–	8-9	10-11
Ортоклаз	2,0	3,0	8,0	8,0
Мусковит	2-3	2-3	6,0	6,0
Доломит	–	–	5-6	7

Из таблицы 2 следует, что рудные минералы в окисленных пробах представлены гидроксидами железа, магнетитом с гематитом ~ 2,3 % и знаковыми значениями пирита. Из нерудных преобладают глинистые минералы, подчиненное значение имеют кварц, мусковит, полевой шпат. Первичные руды представлены пиритом, магнетитом с гематитом, а из нерудных преобладают кварц, альбит, кальцит и амфибол.

По данным минералогического анализа установлено, что золото, и в окисленных, и первичных рудах находится в виде свободных крупных зерен, которые неравномерно распределены по массе руды.

Первоначально были проведены тесты по цианированию исходной руды, крупностью 80 % – 0,071 мм, при соотношении в пульпе Т:Ж = 1:2, pH пульпы за счет добавки извести 10–11, исходная концентрация NaCN 0,10 % (1,0 г/л), продолжительность выщелачивания 24 часа (таблица 3).

Таблица 3 – Показатели выщелачивания золота из окисленных и сульфидных руд

Наименование параметров и показателей выщелачивания	Окисленные пробы		Сульфидные пробы	
	TЮ-1	TC-1	TЮ-2	TC-2
Содержание в жидкой фазе пульпы после 24 часов, мг/л:				
Au	0,813	0,490	1,48	0,710
Ag	0,10	0,08	0,39	0,36
Cu	0,50	8,40	28,60	88,50
Zn	1,09	6,60	1,92	1,84
NaCN, %	0,096	0,094	0,087	0,081
pH среды	10,2	10,5	10,89	11,0
Содержание Au в твердой фазе хвостов, г/т	0,02	0,02	0,26	0,16
Расчетное содержание Au в руде, г/т	1,65	1,00	3,22	1,58
Степень растворения Au, %	98,78	98,00	91,93	89,87
Содержание Au в руде по данным пробирного анализа, г/т	1,54	0,95	2,74	1,335

Полученные результаты цианидного выщелачивания золота показали высокую эффективность процесса. Степень растворения золота из обеих проб окисленной руды достигает 98 % при содержании золота в твердой фазе хвостов 0,02 г/т. Степень растворения золота из сульфидных руд – 89,8–91,9 % при содержании золота в твердой фазе хвостов 0,16–0,26 г/т.

Однако, отмечаются некоторые расхождения в расчетном содержании золота в руде по гравитационным тестам и результатом прямого пробирного анализа. Это вызвано наличием в руде достаточно крупного золота, которое неравномерно распределено в массе руды.

Для вывода из руды крупного золота используют предварительное гравитационное обогащение руды. Это позволяет исключить потери за счет недорастворения крупных золотин при дальнейшем цианидном выщелачивании.

Нами проведено гравитационное обогащение руды на центробежном концентраторе Нельсона при следующих условиях: масса пробы 3 кг; крупность 80 % класса – 0,071 мм; центробежное ускорение 60 G; расход флюидизирующей воды 3,5 л/мин; производительность по твердому 0,5–0,6 кг/мин; избыточное давление флюидизирующей воды 10–14 кПа; содержание твердого в пульпе, подаваемой на гравитационное обогащение, 25–30 %.

Результаты показателей гравитационного обогащения руд приведены в таблице 4.

Несмотря на то, что пробы окисленной руды ТЮ-1 и ТС-1 представлены в большей части глинистой составляющей (50–45 % монтмориллонита), гравитационное обогащение даже этих проб проходит достаточно эффективно. Извлечение золота в концентраты Нельсона из окисленных проб составило 21,4–22,0 %, что для бедных по содержанию золота глинистых руд является вполне приемлемым показателем.

Гравитационная обогатимость первичных проб существенно выше, чем окисленных. Наиболее высокое извлечение золота в гравитационный концентрат достигнуто при обогащении пробы ТЮ-2 – 66,5 %. Обогащение пробы ТС-2 также эффективно (43,4 %) даже при низком исходном содержании золота в руде (1,30 г/т). Наиболее высокие показатели по гравитационному обогащению пробы ТЮ-2 можно объяснить более высоким содержанием золота в исходной руде и наличием значительного количества достаточно крупных зерен самородного золота (рисунок 2).

Таблица 4 – Результаты гравитационного обогащения золотосодержащих руд

Продукт	Выход		Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
	г	%		
Проба руды ТЮ-1 (окисленная)				
Концентрат	77,8	2,60	14,13	22,08
Хвосты	2917,7	97,40	1,33	77,92
Руда	2995,5	100,00	1,66	100,00
Проба руды ТС-1 (окисленная)				
Концентрат	86,8	2,90	7,87	21,44
Хвосты	2909,8	97,10	0,86	78,56
Руда	2996,6	100,00	1,06	100,00
Проба руды ТЮ-2 (первичная)				
Концентрат	99,8	3,35	66,03	66,54
Хвосты	2881,5	96,65	1,15	33,46
Руда	2981,3	100,00	3,32	100,00
Проба руды ТС-2 (первичная)				
Концентрат	99,2	3,34	16,90	43,43
Хвосты	2873,1	96,66	0,76	56,57
Руда	2972,3	100,00	1,30	100,00

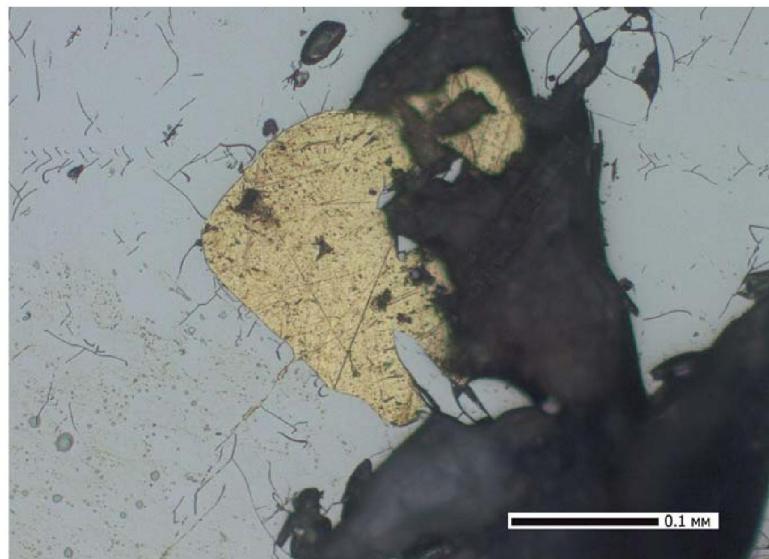


Рисунок 2 – Проба ТЮ-2. Золото в трещиноватом пирите в порфировой породе среднего состава.
Увел. 200 (размер зерен 0,015x0,05 мм)

Полученные хвосты гравитации были направлены на цианидное выщелачивание золота. Цианирование проведено при следующих режимных параметрах: соотношение в пульпе Т:Ж = 1:2, pH пульпы за счет добавки извести 10–11, исходная концентрация NaCN 0,05 % (0,5 г/л), продолжительность выщелачивания 24 часа. Результаты тестов по выщелачиванию золота из хвостов гравитации окисленных проб руды приведены в таблице 5, первичных проб руды – в таблице 6.

При использовании комплексной схемы гравитация-цианирование хвостов гравитации снизилось содержание золота в отвальных хвостах и повысилось суммарное извлечение золота.

Таким образом, применение предварительного гравитационного обогащения золотосодержащих руд перед их цианированием позволяет стабилизировать процесс растворения золота, а также повысить его эффективность.

Таблица 5 – Показатели выщелачивания золота из хвостов гравитационного обогащения окисленных проб руды ТЮ-1 и ТС-1

Наименование параметров и показателей выщелачивания	TIO-1		TC-1	
	тест 1	тест 2	тест 1	тест 2
Загрузка CaO, кг/т	3,5	3,5	4,2	4,2
Содержание в жидкой фазе пульпы после 24 часов, мг/л:				
Au	0,893	0,870	0,559	0,579
Ag	0,140		0,110	
Cu	1,570		23,100	
Zn	1,320		1,410	
NaCN, %	0,049		0,049	
pH среды	10,55		10,45	
Содержание Au в твердой фазе хвостов, г/т	0,010	0,010	0,010	0,010
Расчетное содержание Au в хвостах гравитации, г/т	1,350	1,315	0,849	0,879
Степень растворения Au, %	99,26	99,24	98,82	98,86
Суммарное извлечение Au в гравиоконцентрат и цианидный раствор, %	99,41		99,03	

Таблица 6 – Показатели выщелачивания золота из хвостов гравитационного обогащения сульфидных проб руды ТЮ-2 и ТС-2

Наименование параметров и показателей выщелачивания	TIO-2		TC-2	
	тест 1	тест 2	тест 1	тест 2
Загрузка CaO, кг/т	1,4	1,4	1,4	1,4
Содержание в жидкой фазе пульпы после 24 часов, мг/л:				
Au	0,658	0,681	0,395	0,412
Ag	0,33		0,24	
Cu	22,30		94,00	
Zn	1,01		0,51	
NaCN, %	0,049		0,043	
pH среды	10,95		10,99	
Содержание Au в твердой фазе хвостов, г/т	0,18	0,14	0,16	0,12
Расчетное содержание Au в хвостах гравитации, г/т	1,167	1,162	0,753	0,738
Степень растворения Au, %	84,58	87,95	78,74	83,74
Суммарное извлечение Au в гравиоконцентрат и цианидный раствор, %	95,20		91,44	

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стоимость и запасы золота в мире. Аналитика // <http://ria.ru/infografika/20110824/422749631.html>
- [2] Soos, Andy. Gold Mining Boom Increasing Mercury Pollution Risk // <http://oilprice.com/Metals/Gold/Gold-Mining-Boom-Increasing-Mercury-Pollution-Risk.html>
- [3] Lawrence Williams. Gold's Top 20 – Mines, miners and countries. Minewed investment resource // <http://www.mineweb.com/regions/europe-and-middle-east/golds-top-20-mines-miners-and-countries/>
- [4] Донских А. Барьер для золота: Что мешает благородному металлу стать важным инструментом финансового рынка // Казахстанская правда. – 25 июня 2009. – С. 8.
- [5] Верхозин С.С. Золотодобывающая промышленность Казахстана // <http://zolotodb.ru/news/11194>
- [6] Michael E. Wilson, Elena Lee. Kazakhstan's Gold Mining Sector and the New Regulation on Gold Sales. Alchemist issue sixty six. – 2012. – Р. 12-15.
- [7] Marsden J., House I. The Chemistry of Gold Extraction // West Sussex. – England: Ellis Horwood, 1992.
- [8] Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. – М.: Руда и Металлы, 2013. – С. 130-135.
- [9] Суримбаев Б.Н., Болотова Л.С., Байконурова А.О., Б. Мишра. Изучение кинетики цианидного выщелачивания золота из окисленных и первичных руд // Materials of the international scientific-practical conference «Prospects for the development of modern science», Jerusalem, Israel, May 4-6, 2016. – С. 130-134.
- [10] Суримбаев Б.Н., Болотова Л.С., Байконурова А.О. Поведение золота при гравитационном обогащении окисленных и первичных руд одного из месторождения Казахстана // Материалы Международной научно-практической конференции Абшеронские чтения-2016 «Инновации в комплексной переработке минерального сырья». – Алматы, 2016. – С. 358-362.

REFERENCES

- [1] Stoimost' i zapasy zolota v mire. Analitika // <http://ria.ru/infografika/20110824/422749631.html> (in Russ.)
- [2] Soos, Andy. Gold Mining Boom Increasing Mercury Pollution Risk // <http://oilprice.com/Metals/Gold/Gold-Mining-Boom-Increasing-Mercury-Pollution-Risk.html> (in Eng.)
- [3] Lawrence Williams. Gold's Top 20 - Mines, miners and countries. Minewed investment resource // <http://www.mineweb.com/regions/europe-and-middle-east/golds-top-20-mines-miners-and-countries/> (in Eng.)
- [4] Donskikh A. Bar'er dija zolota: Chto meshaet blagorodnomu metallu stat' vazhnym instrumentom finansovogo rynka. Kazahstanskaja pravda. 25 june 2009. P. 8 (in Russ.)
- [5] Verhozin S.S. Zolotodobyvajushhaja promyshlennost' Kazahstana // <http://zolotodb.ru/news/11194> (in Russ.)
- [6] Michael E. Wilson, Elena Lee. Kazakhstan's Gold Mining Sector and the New Regulation on Gold Sales. Alchemist issue sixty six. 2012. P. 12-15 (in Eng.)
- [7] Marsden J., House I. The Chemistry of Gold Extraction. West Sussex. England: Ellis Horwood, 1992 (in Eng.)
- [8] Zaharov B.A., Meretukov M.A. Zoloto: upornye rudy. M.: Ruda i Metally, 2013. P. 130-135 (in Russ.)
- [9] Surimbayev B.N., Bolotova L.S., Baikonurova A.O., B. Mishra. Izuchenie kinetiki cianidnogo vyshhelachivanija zolota iz okislennyh i pervichnyh rud. Materials of the international scientific-practical conference «Prospects for the development of modern science», Jerusalem, Israel, May 4-6, 2016. P. 130-134 (in Russ.)
- [10] Surimbayev B.N., Bolotova L.S., Baikonurova A.O. Povedenie zolota pri gravitacionnom obogashchenii okislennyh i pervichnyh rud odnogo iz mestorozhdenija Kazahstana. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Abishevskie chtenija-2016 «Innovacii v kompleksnoj pererabotke mineral'nogo syr'ja». Almaty, 2016. P. 358-362 (in Russ.)

**АЛТЫНДЫ КЕННЕН, СУЛЬФИДТІ ЖӘНЕ ТОТЫҚҚАН КЕҢДІ ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ БАЙЫТУ
ҚАЛДЫҚТАРЫНАН ЦИАНИДТІ ШАЙМАЛАУ ӘДІСІН ЗЕРТТЕУ**

Б. Н. Сұрімбаев^{1,2}, Ә. Ә. Байқоңырова¹, Л. С. Болотова², Б. Мишра³

¹К. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан,

²«ҚР МШҚҚӨҮО» РМК Мемлекеттік өнеркәсіптік экология ғылыми-өндірістік бірлестігі

филиалы «Қазмеханобр», Алматы, Қазақстан,

³Вустер политехникалық университеті, Бостон, АҚШ

Түйін сөздер: цианирлеу әдісі, шаймалау, гравитациялық байыту, байытудың арасын тәсілдері, алтын.

Аннотация. Мақалада алтынды кеннең, сульфидті және тотыққан кеңді гравитациялық байытудан кейінгі қалдықтардан цианидті шаймалау әдісінің нәтижелері зерттелген. Химиялық және минералологиялық талдау нәтижелері алдында, гравитациялық байыту сынектары және алынған гравитация қалдықтарын цианирлеу әдісі жүргізілді. Барапқы кеңді цианирлеумен қатар гравитация қалдықтарын цианирлеу әдісі жүргізілді. Барапқы кең мен сульфидті және тотыққан кеңнің гравитациялық байыту қалдықтарын цианирлеу нәтижелері салыстырылды.

Поступила 21.06.2016 г.