

Исследование Возможности Извлечения Золота и Серебра из Магнитной Фракции

¹Хамдамов М.Б., ²Нормуротов Р.И., ¹Холикулов Д.Б.

¹Алмалыкский государственный техничекий институт,

²АО «Навоийский ГМК»

Аннотация. В статье анализируются технологии извлечения золота и серебра из магнитной фракции, образующейся в процессе золотодобычи. В результате анализа предложены процессы гидрохлорирования и хлоридовозгонки для извлечения драгоценных металлов из магнитной фракции.

Ключевые слова: Золото, серебро, магнитная фракционировка, гидрохлорирование, удаление хлоридов, технологические процессы.

Study of the Possibility of Extracting Gold and Silver from the Magnetic Fraction

Abstract. This article analyzes technologies for extracting gold and silver from the magnetic fraction generated during gold mining. The analysis suggests hydrochlorination and chloride sublimation processes for extracting precious metals from the magnetic fraction.

Keywords: Gold, silver, magnetic fractionation, hydrochlorination, chloride removal, technological.

Введение. В настоящее время в Узбекистане выявлено более 2,7 тысяч месторождений и перспективных рудопроявлений различных полезных ископаемых, включающих около 100 видов минерального сырья, из которых более 60 уже вовлечены в производство. Разведано более 900 месторождений, в которых подтвержденные запасы оцениваются в 970 млрд. долларов США. При этом следует отметить, что общий минерально-сырьевой потенциал оценивается более чем в 3,3 триллиона долларов США. По ряду важных полезных ископаемых, таких как золото, уран, медь, вольфрам, калийные соли, фосфориты, каолины Узбекистан по подтвержденным запасам и перспективным рудам занимает ведущие места не только в СНГ, но и во всем мире. Так, по запасам золота республика занимает 5 место в мире, а по уровню его добычи – 8 место. По запасам меди – 10-11 место, урана – 7-8 место [1-3].

Развитие минерально-технической базы страны неразрывно связано с мобилизацией народнохозяйственных резервов. В решении этой проблемы важное место занимают отрасли, добывающие и перерабатывающие минеральное сырье, в частности цветная металлургия. В мобилизации резервов важнейшей задачей цветной металлургии является эффективное использование минерального сырья – повышение комплексности и полноты извлечения всех ценных компонентов. Решение этой задачи возможно путем разработки новых и усовершенствования известных технологических процессов [4-5].

Правительство Республики Узбекистан определило промышленное освоение природных богатств одним из приоритетных направлений в программе развития и реформирования экономики страны. Значительная роль в ней, принадлежит Навоийскому ГМК и Алмалыкский ГМК.

Исследование извлечения золота и серебра из магнитной фракции (МФ) наиболее эффективно через [хлоридную технологию](#) (выщелачивание). Метод позволяет перерабатывать упорное сырье, где драгметаллы ассоциированы с магнетитом или пирротином, обеспечивая высокий процент перехода золота в раствор (до 65% в исследованиях) и последующее разделение [6-7].

Исследования показывают, что данная технология является перспективной, но требует тщательного подбора параметров (температура, концентрация реагентов, время процесса) для максимального выхода металлов.

Магнитная фракция является продуктом, который получается в процессе измельчения руды за счет истирания металлических шаров. Она представляет собой мелкодисперсное в значительной степени неокисленное железо, извлекаемое в хвосты магнитной сепарации гравитационного концентрата.

Необходимость вывода из процесса МФ связана с тем, что возврат ее в процесс уменьшает производительность по руде, ведет к увеличению расхода электроэнергии в цикле измельчения и химических реагентов на операциях «сорбция-десорбция». В результате этого железо, десорбированное вместе с другими вредными примесями со смолы, сбрасывалось в хвостохранилище.

Однако, содержащееся в них золото в количестве 8 -12 г/т, вынуждало искать приемлемый способ, как утилизации МФ, так и возвращения золота в процесс обогащения.

Авторами [8-9] были проведены исследования по переработке МФ гидро- и пирометаллургическими способами на НГМК:

Пирометаллургический метод состоит в плавке МФ на металл и шлак, в результате которой золото переходит в металл с неравномерным распределением (от 0,4 до 13 г/т), а шлак - с равномерным, однако его содержание низкое (0,2-0,3 г/т) и извлечь его затруднительно.

Гидрометаллургическая схема утилизации МФ, заключается в ее серноокислотной обработке. При этом из 1 т МФ получают 2,4 т серноокислого закисного железа, которое необходимо утилизировать, и 80-120 г/т золотосодержащего кека, который перерабатывается в технологической цепочке цеха [1, 4-6]. Серноокислотное растворение МФ осуществляют при параметрах: Т:Ж =1:6-7, температура 80-85 °С, концентрация серной кислоты 230-250 г/л.

Минеев Г.Г. и Панченко А.Ф. [10] предложили механизм растворения серы в щелочах: адсорбция ионов гидроксила на поверхности колец серы S_2 , разрушение колец серы под действием иона OH^- с образованием активированных комплексов $(S-OH)^-$, разрушение активированных комплексов с образованием гидросульфидов и сульфит-ионов, взаимодействие серы с гидросульфид-ионами и образование полисульфидов, взаимодействие полисульфид-ионов с сульфит-ионами и гидроксил-ионами.

Результаты анализа литературных данных [11-13] по выщелачиванию золота различными растворителями представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Сравнительные результаты выщелачивания руды различными растворителями

Система выщелачивания	Расход реагентов, кг на 1 т руды	Степень растворения Au, %
Цианид (pH 10,5-11)	NaCN – 0,15 CaO – 0,55	73
Гипохлорит (pH 6,4-6,5)	NaOCl – 5,55 HCl – 3,25	68
Бром (pH 1,3-2,1)	Br ₂ – 2,85 H ₂ SO ₄ – 6,8	57
Тиосульфат (pH 9,4-9,5)	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃ – 14,5 NH ₃ – 2,0	37
Тиомочевина (pH 1,1-1,3)	CS(NH ₂) ₂ – 3,0 Fe ₂ (SO ₄) ₃ – 9,0 H ₂ SO ₄ – 48,0	57

К числу перспективных способов переработки упорного золотосодержащего сырья можно отнести использовавшиеся в конце XIX в. процессы гидрохлорирования, достоинство которых заключается в высокой химической активности хлора. В настоящее время гидрохлорирование используется в небольших масштабах в ЮАР и Англии для переработки шламов, содержащих благородные металлы, в том числе золото. На некоторых предприятиях (например, Карлин Майнз, США) гидрохлорирование применяется в качестве подготовительной операции перед цианированием [14-16].

Для использовавшихся ранее и применяющихся способов гидрохлорирования характерно значительное выделение хлора в атмосферу. Поэтому ясно, что применение гидрохлорирования для извлечения золота из рудного и вторичного сырья возможно при разработке процесса, характеризующегося низкими расходными коэффициентами по хлору и обеспечивающего безопасность обслуживающего персонала.

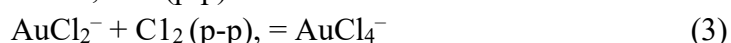
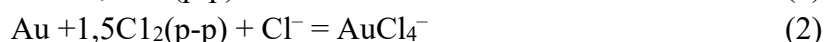
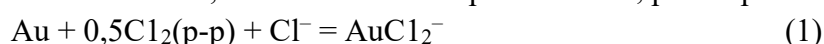
Исследования [14-21] показали, что использование гидрохлорирования для переработки материалов, содержащих благородные металлы, имеет следующие преимущества по сравнению с цианистой технологией:

- большая концентрация окислителя (молекулярный хлор) в растворе обуславливает высокую скорость процесса;
- возможность получения солянокислых растворов, из которых впоследствии удобно выделять золото электролизом;
- эффективная переработка ряда упорных для цианирования Au-содержащих объектов, в том числе углистых, медистых, мышьяковистых и др.;

- в случае переработки золотосеребряных руд легче осуществить разделение благородных металлов при их осаждении из солянокислых растворов;

- извлечение в раствор платины и палладия.

В хлорно-хлоридной среде, т.е. в растворе хлора и хлорида натрия, где Cl⁻ служит не только окислителем, но и комплексообразователем, растворение золота идет по реакциям [5-7]



В последние годы предложен метод растворения золота в кислых хлоридных и хлоридно-сульфатных растворах. В качестве окислителя используют пиролюзит MnO₂, что способствует медленному образованию в объеме раствора активного хлора.

Из хлоридных растворов золото легко восстанавливается щавелевой и муравьиной кислотами, хлоридом олова, углеродом, цинком, оксидом углерода, диоксидом серы и др.

Анализ показал, что в термодинамическом отношении растворение золота возможно не только в цианистых, но и в других растворах, если в них имеются ионы или молекулы, образующие с золотом достаточно прочные комплексы. Значения констант устойчивости (диссоциации) K_y и стандартных потенциалов E⁰ при образовании комплексов золота представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Значения констант устойчивости K_y и стандартных потенциалов E⁰ при образовании комплексов золота [6]

Комплекс	gK _y	Полуреакция окисления	E ⁰ , В
Степень окисления золота 1 ⁺			
–		$\text{Au} - e \leftrightarrow \text{Au}^+$	
[Au(CN) ₂] ⁻		$\text{Au} + 2\text{CN}^- - e \leftrightarrow [\text{Au}(\text{CN})_2]^-$	1,68
[AuS] ⁻	1,0	$\text{Au} + \text{S}^{2-} - e \leftrightarrow [\text{AuS}]^-$	
[Au(S ₂ O ₃) ₂] ³⁻		$\text{Au} + 2\text{S}_2\text{O}_3 - e \leftrightarrow [\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$	0,54
[Au(NH ₂ CSNH ₂) ₂] ²⁺	9,9	$\text{Au} + 2\text{NH}_2\text{CSNH}_2 - e \leftrightarrow [\text{Au}(\text{NH}_2\text{CSNH}_2)_2]^{2+}$	0,47
[AuI ₂] ⁻	9,4	$\text{Au} + 2\text{I}^- - e \leftrightarrow [\text{AuI}_2]^-$	0,14
	5,5		0,38
	2,1		0,58
Степень окисления золота 3 ⁺			
–		$\text{Au} - 3e \leftrightarrow \text{Au}^{3+}$	

$[\text{AuBr}_4]^-$		$\text{Au} + 4\text{Br}^- - 3e \leftrightarrow [\text{AuBr}_4]^-$	1,50
$[\text{AuCl}_4]^-$	6,9	$\text{Au} + 4\text{Cl}^- - 3e \leftrightarrow [\text{AuCl}_4]^-$	0,86
	9,5		1,00

Все альтернативные растворители (хлоридные, бромидные, тиомочевина, тиоцианаты, тиосульфаты) образуют менее устойчивые золотосодержащие комплексы, чем ауроцианид. Поэтому для стабилизации этих комплексов в водной фазе и достижения приемлемых скоростей растворения золота необходима повышенная концентрация растворителей-комплексообразователей (обычно 0,1-1 моль/л, в то время как концентрация цианида-комплексообразователя обычно менее 0,1 моль/л), что определяет необходимость оборачиваемости растворов по экономическим и экологическим соображениям.

Кислород для альтернативных растворителей золота и серебра не подходит из-за его малой концентрации в растворе (мала скорость растворения). Поэтому приходится использовать более «жесткие» окислители, такие как пероксид водорода, хлор, бром, озон или их производные.

Поэтому на стороне альтернативных растворителей золота и серебра должны быть веские аргументы, основанные, во-первых, на более высокой скорости выщелачивания и, во-вторых, на меньшей угрозе окружающей среде.

Процесс хлоридовозгонки весьма универсален, его можно использовать для извлечения золота из концентратов практически любого состава. Важное достоинство этого процесса - возможность комплексной переработки концентратов с извлечением из них не только золота и серебра, но и сопутствующих металлов.

Достоинства хлоридовозгонки: высокое извлечение металлов, обусловленное большой химической активностью хлора; почти полное отделение цветных металлов от железа за одну операцию; возможность селективной отгонки тех или иных хлоридов металлов путём изменения состава газовой фазы; высокая степень сокращения, обеспечивающая получение из бедного сырья богатого продукта - хлоридов, из которых затем получают товарные металлы. Недостаток процесса: необходимость поддержания высокого парциального давления, достигаемого многократным избытком хлора, который находится в обороте.

Анализ термодинамических и кинетических характеристик показал, что для переработки МФ наиболее подходят процессы гидрохлорирования и хлоридовозгонки, которые будут взяты за основу исследований в данной работе.

1. На основании литературных данных, анализа МФ и предварительных опытов по извлечению благородных металлов из МФ предложены процессы гидрохлорирования и хлоридовозгонки. Извлечение золота при гидрохлорировании составляет 65 %, а при хлоридовозгонке 97,7 %.

2. Экспериментально установлено повышение эффективности извлечения благородных металлов при гидрохлорировании и хлоридовозгонки, за счет проведения предварительного окислительного обжига МФ при температуре 700 °С, позволяющая удалить мышьяк, сурьму, серу и перевести железо в нехлорируемую оксидную форму.

Список использованной литературы

1. Strizhko, L.S., Normurotov, R.I. & Kholikulov, D.B. Study of the process for gold hydrochlorination in gold-containing magnetic fraction processing. Russ. J. Non-ferrous Metals 50, 449–451 (2009). <https://doi.org/10.3103/S1067821209050046>
2. <https://www.uzdaily.uz/ru/gornodobyvaiushchaia-otrasl-uzbekistana-privlekla-us-10-mlrd-investitsii/>
3. https://misis.ru/files/2977/Normurotov_Ruslan.pdf.
4. Якубов М.М. и др. Освобождение конвертерных шлаков в отходы в печи Ванюкова при пирометаллургическом производстве меди на АО «Алмалыкский ГМК» //Комплексное использование минерального сырья. – 2024. – Т. 331. – №. 4. – С. 60-68.
5. Абдурахмонов С.А., Масидиков Э.М., Ахтамов Ф.Э. [Возможности комплексной переработки техногенных отходов медного производства](#) // Universum: технические науки, 2022 11-2 (104) С 40-43.
6. Котляр Ю.А., Меретуков М.А., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов //-М.: МИСиС. 2005 г., Кн. 1. 431 с., Кн. 2. 391 с.
7. Хужакулов Н.Б., Пулатова Ш.Б., Бозоров М.Ф. Исследования хлоридной технологии переработки золотосодержащей магнитной фракции // Евразийский Союз Ученых. 2020. №3-2 (72). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-hloridnoy-tehnologii-pererabotki-zolotosoderzhashey-magnitnoy-fraktsii> (дата обращения: 19.03.2026).
8. Саттаров Г.С., Лильбок Л.А., Лильбок В.Г., Акинъшина Г.И., Урусов И.П. //К вопросу утилизации магнитной фракции //Горный вестник Узбекистана. 2004 г., № 4. С. 18-19.
9. Латышев В.Е., Лильбок Л.А., Петухов О.Ф., Думбрава А.А., Иванов Е.Г. Разработка и освоение технологии комплексной переработки магнитной фракции //Горный журнал. 2003 г., №8.
10. Минеев Г.Г., Панченко А.Ф. Растворители золота и серебра в гидрометаллургии //-М.: Металлургия, 1994 г., 240 с.
11. Terry McNulty. Cyanide substitutes //Mining Magazine.- Vol. 184, № 5.- May 2001.
12. Панченко А.Ф., Лодейщиков В.В., Хмельницкая О.Д. Изучение нецианистых растворителей золота и серебра //Цветные металлы. 2001 г., № 5.
13. Лодейщиков В.В., Панченко А.Ф. Технологическая оценка некоторых растворителей золота //Цветная металлургия. 1967 г., № 24.
14. Каковский И. А., Набойченко С. С. Термодинамика и кинетика гидрометаллургических процессов //Алма-Ата: Наука. 1986 г., 272 с.

15. Абдурахмонов С., Холикулов Д.Б., Алматова И.У. Переработка золотосодержащих флотоконцентратов методом термopарoобpаботки // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. 2020. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pererabotka-zolotosoderzhaschih-flotokontsentrato-v-metodom-termoparoobrabotki> (дата обращения: 19.03.2026).
16. [Strizhko L.S.](#), [Normurotov R.I.](#), [Kholikulov D.B.](#) Investigations into extracting gold from gold-containing magnesium fraction by chlorination. Russian Journal of Non-Ferrous Metals., 2009, 50(4), Pp.348–352. <https://link.springer.com/article/10.3103/S1067821209040075>
17. Абуов М.Г., Ковган Л.А. Переработка труднообогатимых руд и промпродуктов методом гидрохлорирования //Цветные металлы. 2008 г., №9
18. Минеев Г.Г., Жучков И.А. Технологические исследования по растворению золота в хлорид-гипохлоритной среде //Изв. Вузов Цветная металлургия. 2005 г., №4, С. 23-27.
19. Меретуков М.А. Хлоридная гидрометаллургия золота //Цветные металлы. 2005 г., №12, С. 54-61.
20. [Jian Ding](#), [Cui-Cui Lv](#), [Peng Qian](#), [Guo-Yan Fu](#), [Ya Liu](#), [Qing-Chun Li](#), [Shu-Feng Ye](#), [Yun-Fa Chen](#). Chlorination Methods Applied to Recover Valuable Metals from Roasting-cyaniding Residue. [Journal of Residuals Science & Technology](#), 2017, Vol 14, Issue 2, p109. DOI 10.12783/issn.1544-8053/14/2/14
21. Kumar, R., Nabeel, M., Dreisinger, D. *et al.* Gold Recovery via High-Temperature Chlorination. Mining, Metallurgy & Exploration 42, 1085–1094 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42461-025-01175-7>