

## **ПЕРСПЕКТИВЫ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОДГОТОВКИ РУДЫ**

**Т.В. Чекушина**

Институт проблем комплексного освоения недр РАН  
*Крюковский туп., д. 4, Москва, Россия, 111020*

Представлены технические и технико-экономические показатели применения интенсификации процессов кучного выщелачивания золота с предварительным разупрочнением (вскрытием) минеральной матрицы сульфидов электрохимическим воздействием.

Наиболее эффективным методом переработки золотосодержащих руд является гидрометаллургия, получившая теоретическое обоснование в работах членкорр. АН СССР И.Н. Плаксина, его учеников и последователей. Одной из составляющих гидрометаллургии является кучное выщелачивание, или физико-химическая геотехнология по классификации, разработанной научным советом РАН по проблемам горных наук.

Для эффективного освоения российской минерально-сырьевой базы золота необходимо адаптировать технологию кучного выщелачивания применительно к переработке упорных сульфидных руд с тонкодисперсной вкрапленностью золота. Существующие методы переработки упорных золотосодержащих руд — обжиг или автоклавное выщелачивание, — получившие распространение за рубежом, связаны со значительными расходами химических реагентов, энергозатратами, кроме того, обжиг небезопасен в экологическом плане. Это предопределяет необходимость создания новых способов вскрытия. Отечественные ученые и технологи в настоящее время активно ведут работу в этом направлении. В работе принимают участие такие известные коллективы как ВНИИХТ, ЦНИГРИ, ИПКОН РАН, МГГА, СКГТУ, Иргиредмет, УНИПРОмедь и др. Исследования школы академика РАН В.А.Чантурия в области электрохимии сульфидных минералов теоретически позволяют использовать электрохимическую обработку для разупрочнения вмещающих сульфидов и раскрытия вкрапленных золотин.

Были изучены фазовый и элементный состав, структура, состояние поверхности, полупроводниковые свойства, проницаемость, окисленность пиритов и арсенопиритов в условиях электрохимической поляризации и реагентной обработки, а также определены степень и характер влияния перечисленных воздействий на цианидное извлечение золота из флото- и гравитационных концентратов.

Процесс вскрытия (разупрочнения) упорных золотосодержащих сульфидов изучался с использованием коллекции минералов различных месторождений. Лабораторные эксперименты проведены на образцах Кургашиканского и Карабашского пиритов, Чармитанского арсенопирита, различающихся по состоянию поверхности, окисленности и содержанию примесных элементов, а также на пирит-

мышьяковистых концентратах Воронцовского, Нежданинского и Бакырчикского месторождений.

Содержание золота в изучаемых пиритах по данным спектрального анализа составляло до 10 г/т, в арсенопирите — 100 г/т. Основные примесные элементы: кремний (до 5%), мышьяк (до 5%), медь (до 2%) и алюминий.

Электрохимическая обработка проводилась в аппаратах, снабженных горизонтально расположенными плоскопараллельными просечными электродами, выполненными из нержавеющей стали марки X18H10T.

Исследование микроструктуры поверхности обработанных сульфидов показало образование пор и зон травления при всех типах воздействия. Однако процессы выщелачивания пиритов протекают по-разному. Было выделено три типа изменений: очистка поверхности (для образцов Кургашинканского пирита — при кислотной обработке, для образцов Карабашского — при электрохимической безреагентной); слабое выщелачивание (для образцов Кургашинканского пирита — при безреагентной электрохимической обработке, для Карабашского — при кислотной); сильное выщелачивание (для образцов всех пиритов — при электрохимической обработке в кислой и щелочной средах).

На основе анализа дифрактограмм образцов установлено, что очистка поверхности и слабое выщелачивание практически не приводят к фазовым или структурным изменениям сульфидов.

Электрохимическая обработка (ЭХО) в кислой среде приводит к образованию новых фаз, отнесенных по значениям межплоскостного расстояния к магнетиту и гематиту; в щелочной среде, наряду с фазовыми изменениями, происходит преобразование кубической структуры минерала в триклинную. Данные рентгено-фазового анализа подтверждают образование новых фаз: кроме магнетита и гематита были обнаружены такие техногенные соединения как люционит и скородит (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты рентгено-фазового анализа исходных и обработанных образцов минералов**

Тип обработки*	Карабашский пирит	Кургашинканский пирит	Чармитанский арсенопирит
Основные фазы			
Без обработки	пирит (FeS <sub>2</sub> ), кварц (SiO <sub>2</sub> ), алюмосиликаты	пирит (FeS <sub>2</sub> ), кварц (SiO <sub>2</sub> ), халькопирит (CuFeS <sub>2</sub> )	арсенопирит (FeAsS), кварц (SiO <sub>2</sub> ), халькопирит (CuFeS <sub>2</sub> )
Новые фазы, обнаруженные после вскрытия минерала			
3% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + ЭХО	гематит (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), магнетит (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	гематит (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	гидрогетит (FeOOH), люционит (Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub> )
3% NaOH + ЭХО	магнетит (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ), гидрогетит (FeOOH)	гидрогетит (FeOOH)	гидрогетит (FeOOH), скородит (FeAsO <sub>4</sub> )

\* ЭХО — электрохимическая обработка; режим обработки: Т : Ж = 1:2, t = 30 мин., i<sub>v</sub> = 8 А/л (при ЭХО)

Процесс вскрытия упорного сырья сопровождается изменением удельного сопротивления и содержания элементной серы на поверхности сульфидов (табл. 2).

**Результаты обработки сульфидов различными реагентами**

Минерал	Тип обработки*	Содержание элементарной серы (моль/г), $n \cdot 10^{-5}$	Удельное сопротивление (Ом·м)
Кургашинканский пирит	без обработки	0,34	0,116
	3% $H_2SO_4$	0,64	0,180
	3% $H_2SO_4$ + ЭХО	0,035	0,200
	3% NaOH + ЭХО	0,53	3,233
	ЭХО без реагентов	0,10	0,127
Карабашский пирит	без обработки	1,02	0,083
	3% $H_2SO_4$	0,10	0,056
	3% $H_2SO_4$ + ЭХО	0,26	0,267
	3% NaOH + ЭХО	0,18	10,50
	ЭХО без реагентов	0,14	0,107
Чармитанский арсенопирит	без обработки	0,10	0,011
	3% $H_2SO_4$	0,28	0,005
	3% $H_2SO_4$ + ЭХО	0,42	0,005
	3% NaOH + ЭХО	0,10	0,030
	ЭХО без реагентов	0,30	0,018

\* ЭХО — электрохимическая обработка; режим обработки: Т : Ж = 1 : 2,  $t = 30$  мин.,  $i_v = 8$  А/л (при ЭХО)

Экспериментально установлено, что удельное сопротивление наиболее активно повышается при электрохимической обработке в щелочной среде. Увеличение удельного сопротивления образца с 0,1166 до 3,233 Ом·м привело к изменению фазовых и структурных характеристик Кургашинканского пирита при электрохимической обработке в среде едкого натра. Аналогичный эффект отмечен и на образце Карабашского пирита: удельное сопротивление после электрохимических воздействий в растворе 3% NaOH возросло с 0,083 до 10,5 Ом·м, что свидетельствует как о структурных изменениях, так и об образовании на поверхности и в объеме пористой окисленной формы гидрогетита.

Содержание серы на поверхности минералов меняется в соответствии с видом обработки. Кислотная обработка Кургашинканского пирита сопровождается увеличением содержания элементарной серы с  $0,34 \cdot 10^{-5}$  до  $0,64 \cdot 10^{-5}$  моль/г. Комбинированная обработка по-разному влияет на окисленность поверхности минерала: если электрохимическое воздействие в кислой среде практически полностью очищает образец (до  $0,035 \cdot 10^{-5}$  моль/г элементарной серы), то использование щелочи повышает содержание элементарной серы до  $0,53 \cdot 10^{-5}$  моль/г.

На основе экспериментально определенных значений рН, окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и концентрации растворимого железа в жидкой фазе пульпы (табл. 3) с использованием диаграмм состояния системы «сульфид-вода» проведен анализ конечных продуктов, образующихся при реагентном, электрохимическом и комбинированном вскрытии.

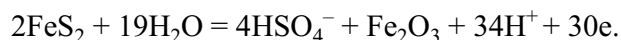
Сернокислотная обработка всех исследованных продуктов сопровождается изменением рН (1,29 — -2,1) и увеличением ОВП (483—850 мВ).

**Физико-химические характеристики рудных суспензий при вскрытии упорных золотосодержащих продуктов**

Условия обработки*, реагенты		Показатели		
		pH	ОВП	CFe, мг/л
Воронцовского месторождения				
Химическая	3% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	<u>-1,80</u> -2,10	<u>+710</u> +850	180,0
	3% NaOH	<u>12,0</u> 11,7	<u>-120</u> -130	
Электро-химическая (ЭХО)	без реагентов	<u>6,7</u> 8,4	<u>+80</u> -97	11,5
	3% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	<u>-1,9</u> -1,0	<u>+660</u> +570	
	3% NaOH	<u>12,8</u> 13,4	<u>-120</u> -265	
Нежданинского месторождения				
Химическая	3% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	<u>1,29</u> 1,28	<u>+483</u> +488	89,5
	3% NaOH	<u>12,3</u> 11,8	<u>-129</u> -130	
Электро-химическая (ЭХО)	без реагентов	<u>6,7</u> 8,4	<u>+80</u> -97	11,5
	3% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	<u>-1,9</u> -1,0	<u>+660</u> +570	
	3% NaOH	<u>11,8</u> 12,4	<u>-171</u> -193	

\* Режим обработки: T : Ж = 1 : 2, t = 30 мин., i<sub>v</sub> = 8 А/л (при ЭХО)

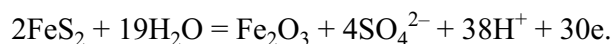
В этих условиях происходит окисление пирита с образованием гематита по уравнению



Окисление арсенопирита сопровождается образованием ионов железа (II) и (III), а также H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub>.

При щелочной обработке (pH = 12,3—11,7; ОВП = -120 — -130 мВ) окисление пирита сопровождается образованием устойчивой фазы гематита, а арсенопирита — гидроксидов железа (III) и гидроарсенат-ионов HAsO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

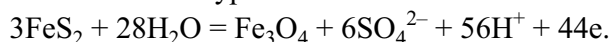
Безреагентное электрохимическое воздействие на сульфиды характеризовалось значением pH = 6,5—8,7, изменением ОВП в пределах +110 — -90 мВ. Пирит окисляется с образованием стабильной фазы гематита по уравнению



Для арсенопирита конечными продуктами окисления являются FeAsO<sub>4</sub>, Fe(OH)<sub>3</sub>, мышьяковистая кислота, а также HAsO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup>.

Комбинирование электрохимических воздействий с кислотной обработкой приводит к снижению pH, усилению окислительных свойств и активизирует растворение промежуточной фазы гематита, образующейся при окислении пирита. Окисление арсенопирита в этих условиях протекает с преобладающим, по сравнению с реагентной обработкой, образованием Fe<sup>3+</sup> и меньшим — H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub>.

Применение электрохимической обработки в щелочной среде приводит к образованию устойчивой фазы гематита на пирите, изменение последнего происходит с образованием магнетита по уравнению



Характерные для данного типа обработки величины ОВП лежат на границе возможного образования обеих фаз. Окисление арсенопирита в этих условиях может сопровождаться образованием как  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , так и  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ .

Общая тенденция вскрытия сульфидных руд подтверждается результатами изменений ОВП, pH и концентрации железа в жидкой фазе пульпы при химической и электрохимической обработках пирит-мышьяковистого концентрата.

Изменения ОВП и pH от начального до конечного контакта реагента с рудой происходят более интенсивно при использовании электрохимической обработки, что свидетельствует об усилении процессов окисления и выщелачивания рудных составляющих при наложении электрохимических воздействий на пульпу. В случае выщелачивания руды растворами только  $\text{H}_2\text{SO}_4$  концентрация ионов железа в жидкой фазе составляла 150 мг/л, а при электрохимическом воздействии в среде  $\text{H}_2\text{SO}_4$  такой же концентрации — 260 мг/л. Подобная степень растворения при химическом выщелачивании требует в 2,5 раза большей концентрации серной кислоты, чем при электрохимическом.

Расчет оптимальных режимов обработки проводился с использованием метода факторного планирования по Боксу—Уилсону. С помощью этого метода была установлена взаимосвязь различных воздействий на вмещающий золото минеральный агрегат: концентрации реагента ( $C$ ) и объемной плотности тока ( $i_v$ ) с условиями их применения, т.е. с продолжительностью обработки ( $t$ ) и соотношением твердой и жидкой фаз ( $T : Ж$ ). Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии показала, что определяющими факторами являются объемная плотность тока и расход кислоты.

В результате анализа эмпирического уравнения были определены оптимальные параметры процесса растворения пиритов и арсенопиритов для лабораторной установки:  $C = 2\text{—}3\%$ ,  $i_v = 8\text{А/л}$ ,  $t = 30$  мин.,  $T : Ж = 1 : 2$ .

Процесс вскрытия характеризуется интенсивностью выщелачивания мышьяка и железа. Установлено, что в растворах NaOH при одинаковых значениях потенциалов мышьяк выщелачивается более интенсивно, чем железо. Максимальное растворение мышьяка и железа приходится на значения потенциала 0,3—0,55 В, после чего отмечается спад выхода металлов в раствор, что объясняется их пассивацией образующейся элементной серой.

Разупрочнение минеральной матрицы при химическом и электрохимическом вскрытии облегчает доступ цианидного раствора к поверхности золотин, тем самым, интенсифицируя процессы извлечения золота в раствор. Результаты последующего за вскрытием цианирования показывают, что предварительное вскрытие различными методами позволяет повысить извлечение золота до 67,3—84,7%, причем максимальный эффект получен при комбинированной химико-электрохимической обработке (табл. 4).

**Влияние типа и параметров электрохимических воздействий  
на цианидное извлечение золота из Нежданинского концентрата**

Тип вскрытия	Условия обработки*	Извлечение золота (%)
Без вскрытия	-----	50,5—55,2
Химический	в растворе 2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	76,2
	в растворе 3% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	78,2
	в растворе 3% NaOH	67,3
Электро- химический	без реагентов (в воде); $i_v = 8$ А/л; $U = 17$ В	81,8
	в растворе 2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; $i_v = 8$ А/л; $U = 5$ В	82,6
	в растворе 3% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; $i_v = 8$ А/л; $U = 4$ В	84,7
	в растворе 2% NaOH; $i_v = 8$ А/л; $U = 6$ В	79,6
	в растворе 3% NaOH; $i_v = 8$ А/л; $U = 5$ В	84,1

\* Для всех видов вскрытия Т : Ж = 1 : 2, время обработки  $t = 30$  мин.

Извлечение золота при кислотной электрохимической обработке составляет 84,7%, а интенсификация процесса цианирования предварительным электрохимическим вскрытием в среде 3% NaOH позволяет получить выход по золоту 84,1%. Несмотря на некоторое снижение извлечения золота (по сравнению с электрохимической кислотной обработкой), электрохимическая обработка в щелочной среде более предпочтительна по экологическому критерию, так как происходит образование в кеках нерастворимого мышьяковистого осадка — скородита.

В ходе опытно-полупромышленных испытаний были получены данные по закислению золотосодержащей горной массы месторождения Бакырчик. Подобное закисление необходимо осуществлять для подавления депрессантов, прежде всего органического вещества.

Зависимость закисления имеет практически линейный характер. Соотношение Т : Ж, время процесса и расход кислоты определяются преимущественно кислотоемкостью руд.

Переработку упорной золотосодержащей руды (общей загрузкой 500 кг) осуществляли в четырех перколяторах, изготовленных из полиэтиленовых труб, снабженных графитовыми электродами.

Для дополнительного вскрытия золотосодержащих сульфидов вели 14-часовую электрохимическую обработку при объемной плотности тока  $i_v = 0,9—1,5$  А/л. Затем в течение 96 часов производили цианирование (при концентрации цианида натрия 0,15%) с последующим осаждением металла на активированном угле.

В результате использования дополнительного электрохимического вскрытия извлечение золота увеличилось с 60,8% (при использовании процесса химического выщелачивания) до 78,2%.

На основе исследования методов электрохимического вскрытия упорных руд и опытно-полупромышленных испытаний разработаны принципиальная технологическая схема кучного электрохимического выщелачивания.

Возможность использования технологии кучного электрохимического выщелачивания и ее конкурентоспособность определялись по разработанной и апробированной методике сравнительной экономико-математической оценки различных геотехнологий. Проанализированы геотехнологические способы освоения многолетнемерзлой глубоко погребенной россыпи: подземная отработка с извлечением золота на обогатительной фабрике методом флотационного разделения минеральной массы с последующей плавкой «золотой головки»; ее отработка методами кучного выщелачивания, шахтного подземного выщелачивания, скважинного подземного выщелачивания и рассчитаны основные показатели по технологии кучного электрохимического выщелачивания [5].

Методика позволяет произвести сопоставление всех существующих технологий на основе определения синтезирующего показателя, включающего в себя групповой технологический показатель (извлечение золота, полнота отработки запасов, производство золота в год) и стоимостную оценку (себестоимость получения 1 г металла). Для чего определяются пороговые значения и весомость технологических параметров и рассчитываются коэффициенты их использования. По итоговым показателям можно выбрать оптимальную для конкретного предприятия технологию получения металла. Наибольший синтезирующий показатель определен для технологии кучного электрохимического выщелачивания.

Проведены расчеты и маркетинговые исследования по использованию технологии кучного электрохимического выщелачивания упорных золотосодержащих руд, которые позволили разработать новые способы электрохимического получения золота [1; 2; 3; 4] и стали основой для утверждения перспективности данного метода.

#### ЛИТЕРАТУРА

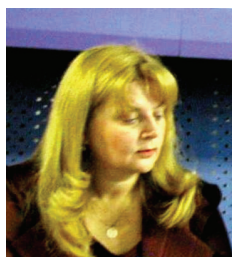
- [1] Бубнов В.К., Чантурия В.А., Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Шибяев А.П. Способ кучного электрохимического выщелачивания руд: Патент 2062869 РФ, МПК<sup>6</sup> Е 21 В 43/28, БИ № 18, 1996.
- [2] Воробьев А.Е., Забельский В.К., Сазонов А.Г., Рыскильдин К.Я., Чернецов Б.С., Чекушина Т.В. Способ кучного электрохимического выщелачивания металлов: Патент 2087696 РФ, МПК<sup>6</sup> Е 21 С 41/26, БИ № 23, 1997.
- [3] Воробьев А.Е., Чекушина Т.В. Электрохимическое кучное выщелачивание золота из упорных руд // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 1999. — № 1. — С. 63.
- [4] Чантурия В.А., Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Федоров А.А. Способ кучного электрохимического выщелачивания руд: Патент 2110681 РФ, МПК<sup>6</sup> Е 21 В 43/28, БИ № 13, 1998.
- [5] Электрохимическое выщелачивание металлов: Учебное пособие. Ч. 1, 2 / Воробьев А.Е. Лобанов Д.П., Малухин Н.Г., Чекушина Т.В. — М.: МГТА, 1997.

## **PROSPECTS OF COMPACT DESALINATION GOLD WITH APPLICATION OF ELECTROCHEMICAL METHODS OF PREPARATION OF ORE**

**T.V. Chekushina**

Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklay str., 6, Moscow, Russia, 117198*

Technical and technical-economical parameters of application of an intensification of processes compact desalination of gold with preliminary softening (opening) of a mineral matrix of sulfides by electrochemical influence are presented.



**Чекушина Т.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр РАН. Автор более 250 публикаций в области добычи и переработки полезных ископаемых, геоэкологии и экономики