

ЗУБЕНКО Артур Владимирович

**ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВСКРЫТИЯ
И ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНЫХ РУД НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 25.00.13 - «Обогащение полезных ископаемых»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2004

Работа выполнена в Институте проблем комплексного освоения недр
Российской академии наук (ИПКОН РАН)

Научный руководитель: академик РАН, доктор технических наук, профессор
Чантурия Валентин Алексеевич»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Соложенкин Петр Михайлович

кандидат технических наук
Николаева Татьяна Сергеевна.

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский
институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского (ВИМС)

Защита с о с "6" апреля 2004 г. 12 часов
на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 в Институте проблем
комплексного освоения недр РАН (ИПКОН РАН) по адресу: г.Москва,
Е-20, Крюковский тупик, 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН

Автореферат разослан "26" февраля 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук •



Шрадер Э.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ!

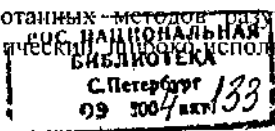
Актуальность проблемы. В развитии золотодобывающей промышленности России в последние годы отмечается тенденция к снижению доли россыпных месторождений в общем объеме добычи. Исчерпано около 75% начального потенциала россыпной золотоносности, при практически не разрабатывающихся коренных золоторудных месторождениях, учтенные запасы которых в 2,9, а прогнозные - в 10 раз превышают показатели для россыпного золота.

Развитие ряда технологий, в том числе и кучного выщелачивания позволяет включить в переработку руды с содержанием золота около 1г/т и добиваться его извлечения до 60-80%. Однако, переработка золотосодержащих руд многих месторождений сдерживается фактором упорности к последующему извлечению золота гидromеталлургическими методами. Сложные технологические схемы переработки являются энергоемкими, главным образом из-за многостадийного доизмельчения продуктов. Присутствие в большинстве руд арсениопирита сдерживает возможность их переработки по гравитационно-флотационным схемам из-за жестких требований к флотационному концентрату по содержанию мышьяка и практически исключает пирометаллургию. Крупномасштабное использование биотехнологии в России затруднено, так как большинство коренных золоторудных месторождений расположено в зонах вечной мерзлоты.

Наиболее распространенный фактор упорности вызван нахождением золота внутри сульфидного минерала, как правило пирита и арсениопирита, причем минимальный размер вмещенных золотин составляет от десятых до сотых долей микрона. Решение технологической проблемы достигается за счет процесса вскрытия, осуществление которого обеспечивает доступ цианида или другого выщелачивающего реагента к поверхности золота, вкрапленного во вмещающий сульфид. Имеющиеся на сегодняшний день методы вскрытия связаны со значительными расходами реагентов, энергозатратами и небезопасны в экологическом плане.

Вместе с тем, для разупрочнения вмещающего минерала и раскрытия вкрапленного в него золота возможно применение методов энергетических воздействий, широко используемых в последнее десятилетие для направленного изменения технологических свойств минералов и руд. Известно, что использование энергии ускоренных электронов, электромагнитных импульсов, электрохимических и микроволновых воздействий позволяет модифицировать поверхностные, прочностные и окислительно-восстановительные характеристики минерала и обеспечить его вскрытие.

Одним из наиболее научно проработанных методов разупрочнения вмещающего минерала является электрохимический, используемый в



последние десятилетия для направленного изменения технологических свойств минералов. Основоположниками работ в данной области являлись И.Н.Плаксин, Р.Ш.Шафеев, В.А.Чантурия, В.Е.Вигдергауз и другие авторы. В развитие метода электрохимического выщелачивания минеральных комплексов внесли значительный вклад В.А.Чантурия, Н.В.Пузей, Г.В.Седельникова, А.С.Черняк, Т.В.Чекушина и другие.

Создание условий, при которых цианид будет иметь доступ к тонковкрапленному золоту, происходит только при нарушении физической монолитности пространственной структуры рудных зерен. Для обнаружения характера этих изменений- был применен метод анализа изображений, обладающий? наибольшей информативностью благодаря возможности регистрации морфометрических характеристик минеральных комплексов.

В области минералогии и переработки полезных ископаемых метод оптико-геометрического анализа изображений получил развитие благодаря работам В.С.Гайдуковой, В.А.Чантурия, Т.Н.Башлыковой, А.Я.Данильченко и др. Первые работы по определению минеральных фаз с помощью анализа изображений были проведены в институте ВИМС А.А.Глаголевым в тридцатых годах прошлого века. Применение анализа изображений- позволяет резко снизить число сложных лабораторных экспериментов за счет возможности оперативного анализа большого статистического материала по структурно-фазовой характеристике компонентов руды. Рассматриваемый метод позволяет получать количественную информацию о характере вкрапленности и пространственном распределении минеральных фаз, их ассоциации, а также степени раскрытия руды по различным минералам, морфометрическим характеристикам частиц, форме дефектов на их поверхности и некоторых других параметрах. В данной работе рассмотрены теоретические. и практические аспекты применения анализа изображений для изучения механизма вскрытия вмещающих золото сульфидов: железа и мышьяка, изменения морфометрических характеристик сульфидной составляющей золотосодержащих руд и концентратов в процессе электрохимических воздействий.

Цель, работы. Совершенствование технологий предварительного вскрытия упорных сульфидных концентратов на основе изучения их электрофизических и морфометрических характеристик.

Идея работы: заключается в применении метода оптико-геометрического анализа изображений для экспрессной оценки электрохимического воздействия на морфометрические свойства и разрушение золотосодержащих сульфидов.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы проведены анализ и обобщение литературных источников, в экспериментальной работе использованы современные физические и физико-химические--методы исследований: рентгенофазовый- анализ, вещества; спектральный; анализ химического состава вещества; определение

электрофизических свойств и степени окисленности сульфидных минералов (удельное сопротивление); оптико-геометрический анализ изображений; растровая электронная микроскопия; рН-метрия и потенциометрия жидкой фазы; химико-аналитические методы определения поверхностной элементарной серы, содержания железа и мышьяка в жидкой фазе; гранулометрический и минералогический анализ продуктов обогащения; математические методы планирования и обработки экспериментов.

Научная новизна. Экспериментально установлено, что интенсификация электрохимического процесса вскрытия минеральных комплексов происходит за счет создания дополнительных микротрещин и разрушения сульфидов, вследствие протекания электрохимических реакций на поверхности и в объеме сульфидных минералов.

Впервые с применением анализатора изображений экспериментально установлено влияние изменения морфометрических характеристик сульфидных частиц на процесс их электрохимического вскрытия и последующего цианирования.

Разработана методика и критерий оценки эффективности цианирования упорных золотосодержащих пирит-мышьяковистых руд и концентратов с использованием анализа изображений сульфидных обломков.

Практическая ценность работы. Определены оптимальные режимы комбинированной химико-электрохимической обработки упорных пирит-мышьяковистых руд, концентратов и техногенного сырья, что позволило повысить извлечение золота на 23-26%.

Обосновано применение оптико-геометрического анализа изображений при исследовании пирит-арсенопиритного геолого-технологического типа руд, позволяющего значительно снизить количество лабораторных экспериментов при создании схем переработки упорного сырья.

Экспериментально установлено, что полнота вскрытия сульфидов, в наибольшей степени, зависит от продолжительности электрохимической обработки и объемной плотности тока.

Рассчитаны экономически эффективные режимы обработки и границы применимости электрохимического метода интенсификации вскрытия.

Реализация результатов. Совместно с ЦНИГРИ проведены укрупненные лабораторные испытания установки по электрохимическому вскрытию упорных золотосодержащих продуктов, показавшие эффективность данного метода и возможность повышения извлечения золота на 23-26%.

Апробация результатов. Диссертационная работа и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на конференции молодых ученых ИПКОН РАН (Москва, 2002), на неделе горняка МГУ (Москва, 1998-2003гг.), на Годичном собрании Мо РАН "Минералогия-основа использования комплексных руд" (Санкт-Петербург, 2001), на Плаксинских чтениях "Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых" (Петрозаводск, 2003 г).

Публикации. По результатам работы опубликовано 7 статей.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из **105** наименований, приложения. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, включая 16 таблиц и 33 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ?

Современное состояние, проблемы переработки и интенсификации вскрытия физически упорных сульфидных золотосодержащих руд и концентратов.

В связи с увеличением доли коренных месторождений в общем балансе золотодобычи, возникла необходимость совершенствования технологий, позволяющих включить в переработку руды с содержанием золота до 1 г/т. Большие, запасы, пиритного, мышьяковистого и углистого сырья, трудно поддающегося цианированию, требуют создания экономичных методов преодоления упорности золотосодержащих руд и концентратов. Традиционный- метод переработки коренного золота заключается в цианировании руд, по отношению к этому методу вкрапленные сульфидные руды с тонким и тонкодисперсным золотом являются труднообогатимым сырьем. В настоящее время проводятся широкие исследования по разработке эффективных технологий по их вовлечению в переработку. В первую очередь это работы институтов ЦНИГРИ, ИРГИРЕДМЕТ, ВНИИХТ, ИПКОН РАН, МИСиС, ИрГТУ и других.

Рассмотрение современного состояния золотодобывающей промышленности в РФ' и за рубежом позволяет сделать вывод, что цианирование будет оставаться наиболее эффективным и распространенным способом переработки. Основную сложность при цианировании труднообогатимых золотосодержащих руд представляют физически упорные тонкодисперсные вкрапленные руды. Освоение крупных рудных месторождений золота зависит от наличия у добывающей промышленности эффективных способов предварительного вскрытия физически упорного золота. Усложнение минерального и вещественного» состава золотосодержащего сырья требует при разработке эффективных технологий обогащения получения более обширной и достоверной информации об особенностях состава и вкрапленности как ценных компонентов, так и минералов породы. Для решения этих проблем применяют новые методы исследования и совершенствуют старые, позволяющие изучить неисследованные ранее свойства и использовать их при разработке процессов обогащения. Одним из таких методов является оптико-геометрический анализ изображений, экспрессно определяющий морфометрические характеристики минеральных объектов.

Использование методов оптико-геометрического анализа позволяет изучать особенности селективного вскрытия минералов при энергетических воздействиях, и тем самым обосновывать направления оптимизации переработки упорных золотосодержащих концентратов и руд, а также делать научно обоснованный прогноз эффективности процессов вскрытия упорных продуктов. Оптико-геометрические методы обладают широким диапазоном возможностей благодаря сочетанию морфометрического анализа отдельных минеральных зерен с измерением физико-химических характеристик минерала на локальном участке зерна.

Исследование состояния золотосодержащих сульфидов и жидкой фазы при электрохимической обработке.

Процесс разупрочнения (вскрытия) золотосодержащих пиритов и арсенопиритов и пирит-мышьяковистых продуктов исследовался на подобранной коллекции минералов различных месторождений. Для лабораторных экспериментов были выбраны пять образцов пирита (Кургашинканского, Карабашского, Калангуйского, Дарасунского и Березовского месторождений) и два образца арсенопирита (Чармитанского и Нежданинского месторождений), различающихся по состоянию поверхности, окисленности и содержанию примесных элементов. Технологические эксперименты по оценке влияния энергетических воздействий на процесс цианирования? упорных тонковкрапленных золотосодержащих продуктов проведены на гравитационном • концентрате Нежданинского месторождения, химический состав которого приведен в таблице 1. Определение золота и основных примесных элементов проводилось по данным термоэмиссионного спектрального анализа. Содержание золота составило от 1 до 40 г/т в пробах пирита и от 10 до 100 г/т в пробах арсенопирита.

Таблица 1

Химический состав гравитационного концентрата Нежданинского месторождения

| Содержание, % | | | | | | | | | г/т | |
|---------------|------------------|------------------|--------------------|------|-----|------|----|-----|-----|-----|
| Fe | SiO ₂ | S _{общ} | S _{сульф} | As | C | Cu | Pb | Sb | Au | Ag |
| 25,4 | 18,7 | 19,7 | 19,5 | 14,6 | 4,5 | 0,04 | 2 | 0,1 | 80 | 121 |
| общ | | | | | орг | | | | 102 | |

Электрохимическая обработка проводилась на установке, изображенной на рис.1. Горизонтально расположенные электроды (3) были выполнены из стальной сетки марки Х18Н1 ОТ.

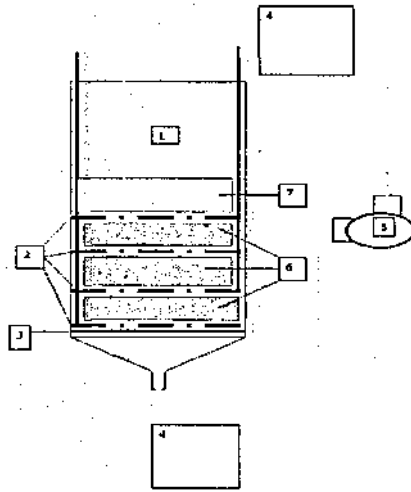


Рис. 1 Схема экспериментальной лабораторной установки для электрохимического и омбинированного вскрытия золотосодержащих сульфидов: 1- ячейка для электрохимической обработки; 2- электроды; 3-фильтрующая диафрагма; 4- буферные емкости; 5- насос; 6-рудная масса; 7-слой рабочего раствора.

Оценка возможного состава поверхности сульфидов железа для условий электрохимического воздействия проводилась с помощью программного комплекса "Селектор", разработанного в ИГ СО РАН, а также по экспериментально определенным значениями pH, Eh и C_{Fe} (рис.2).

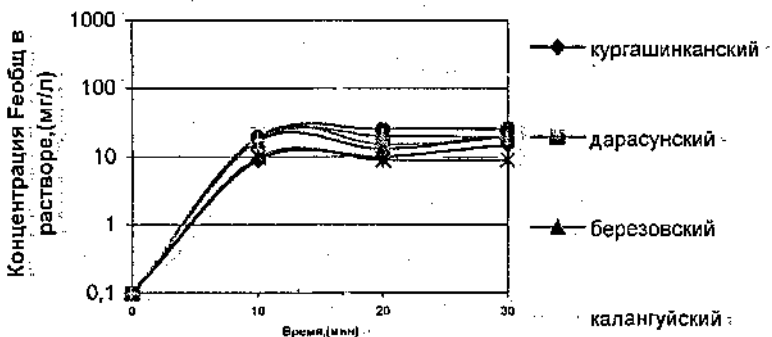


Рис. 2. Зависимость концентрации $Fe_{общ}$ в растворе от времени электрохимической обработки. Объемная плотность тока $J=2$ А/л.

Предполагаемый согласно данным термодинамического анализа состав поверхности минералов и жидкой фазы при электрохимической обработке нежданинского концентрата представлен в (табл.2).

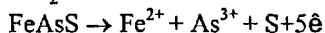
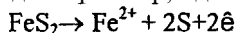
Таблица 2

Физико-химические характеристики жидкой фазы и предполагаемый состав поверхности минералов.

| № п/п | Тип обработки | Характеристики жидкой фазы*) | | | Состав поверхности | |
|-------|--|------------------------------|--------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | | pH | Eh, мВ | C _{Fe} , мг/л | пирит | арсенопирит |
| 1 | Электрохимическая | 5,75 | +193 | 0 | Fe ₂ O ₃ | Fe(OH) ₃ |
| | | 5,39 | +370 | 171 | | |
| 2 | Электрохимическая в 1н растворе H ₂ SO ₄ | 1,48 | +668 | 0 | Fe ₂ O ₃ | Fe(OH) ₃ |
| | | 1,64 | +470 | 486 | | |
| 3 | Электрохимическая в 1н растворе NaOH | 12,8 | -120 | 0 | Fe ₃ O ₄ | Fe(OH) ₂ αFeO(OH) |
| | | 13,5 | -256 | 1100 | | |

*) числитель – исходное значение, знаменатель – конечное

Реакция анодного растворения сульфидов железа, при которой катионы переходят в раствор, идет по схеме:



В условиях обработки в кислой среде по данным термодинамического моделирования наиболее вероятно образование H₃AsO₄; H₃AsO₃; Fe²⁺. В щелочной среде процесс протекает с образованием Fe(OH)₃ и AsO₄³⁻. Для условий безреагентной электрохимической обработки преимущественно возможно образование Fe₂O₃; FeAsO₄·2H₂O; Fe(OH)₃(поверхность), As³⁺, As⁵⁺, HAsO₄²⁻ и H₂AsO₄⁻ (раствор).

С применением данных измерений (до и после обработки) поверхностной элементной серы, фотоколориметрического метода анализа жидкой фазы и рентгенофазового анализа определено, что при электрохимической безреагентной и в присутствии H₂SO₄ обработках за счет растворения вмещающих золото сульфидов железа, концентрация Fe_{общ} в жидкой фазе достигает 171 и 486 мг/л. Интенсивность окислительного процесса при растворении сульфидов носит непостоянный характер. В первый момент времени скорость растворения быстро нарастает, затем наблюдается насыщение и медленный спад, обусловленный, по видимому, образованием пассивирующего слоя элементной серы на поверхности и установление постоянной скорости выщелачивания. В этих условиях окисление пирита протекает с образованием гематита, причем в присутствии кислоты образовавшаяся фаза растворяется с переходом в раствор Fe³⁺. Окисление арсенопирита сопровождается образованием Fe(OH)₃ на поверхности, а при использовании серной кислоты - ионов железа II и III, а также H₃AsO₄ в растворе. Равновесный потенциал окисления у арсенопирита ниже, чем у

пирита, что означает более высокую способность к окислению.

Электрохимическая обработка пирита в среде едкого натра сопровождается образованием устойчивой фазы магнетита, а арсенопирита - гидроксидов железа (II) и переходом в раствор гидроарсенат-ионов HAsO_4^{2-} . Окисление $\text{Fe}(\text{OH})_2$ до $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и взаимодействие последнего с HAsO_4^{2-} может приводить к образованию поверхностной пленки FeAsO_4 (скородит).

При безреагентной электрохимической обработке на поверхности сульфидов железа и мышьяка преобладает элементная сера (~75% от состава, поверхностных фаз), гематит и гетит. Элементный состав поверхности пирита и арсенопирита в данных условиях практически одинаков. Электрохимическая обработка в сильноокислой среде сопровождается образованием на пирите фаз серы, гетита и гематита (соответственно 52%, 43% и 5%), а на арсенопирите равного соотношения серы и гетита. Использование в процессе электрохимического вскрытия раствора NaOH сопровождается образованием фаз свободной серы и гематита, как на поверхности пирита, так и арсенопирита в соотношении соответственно 68% и 32%, 69% и 31%.

Использование методов термодинамического моделирования предусматривает целый ряд ограничений. Во-первых, не учитываются особенности кристаллической структуры минералов. Так, в относительно короткий промежуток воздействия, маловероятно образование кристаллической структуры Fe_2O_3 или $\text{aFeO}(\text{OH})$, а предпочтительно > появление аморфного $\text{Fe}(\text{OH})_3$, что подтвердилось анализом характера осадка в растворе после выщелачивания. Во-вторых, расчет проводился для условий химически чистых соединений с кратным соотношением катионной и анионной части. В связи с этим существуют некоторые расхождения между прогнозным и выявленным (с использованием рентгенофазового анализа) составом поверхности минералов.

Таким образом, установлена возможность растворения золотоносных сульфидных минералов в условиях электрохимического воздействия, а также определен состав образующихся соединений и границы их устойчивости, оказывающие влияние на ход цианирования.

Оценка изменения поверхности пирита и арсенопирита при различных типах электрохимической обработки.

Для более детального определения особенностей процессов, протекающих на границе минерал-раствор, с помощью анализатора изображений были проведены исследования изменения поверхности шлифов пирита и арсенопирита (10x10 мм), помещаемых в рудную массу. (-0,315 мм) при электрохимической обработке.

Исследование изменения микроструктуры поверхности позволило установить, что при электрохимической обработке в среде H_2SO_4

первоначально происходит сглаживание микрошероховатостей, сопровождающееся повышением отражательной способности поверхности (рис. 3а, б). После продолжительного выщелачивания (в течение 8ч) обнаружено образование каверн, трещин и зон травления. Отмечается, что места травления приурочены к механоактивированным дефектам, образовавшимся на начальной стадии шлифовки (рис. 3в).

После каждого вида обработки поверхность аншлифов зачищалась и перешлифовывалась. В отличие от кислотной, при электрохимической обработке в щелочной среде произошло значительное возрастание рельефа поверхности, также установлено увеличение количества микротрещин и каверн (рис. 4а,б). Силикатная цементация, присутствующая на образцах арсенипирита (рис. 3г-е (темное)), сохранившаяся неизменной при кислотной обработке, в условиях: щелочной электрохимической обработки была полностью растворена за 2ч (рис.4в), что дополнительно интенсифицировало вскрытие (рис.4г).

Для определения влияния топологии поверхности на интенсивность ее электрохимического растворения был проведен эксперимент, в ходе которого электрохимически обрабатывался аншлиф с двумя параллельно отшлифованными? сторонами, одна сторона была последовательно отшлифована на мелком зерне -0,5 мкм и затем отполирована (рис.5а), другая шлифовалась только на зерне -5 мкм (рис.5в).

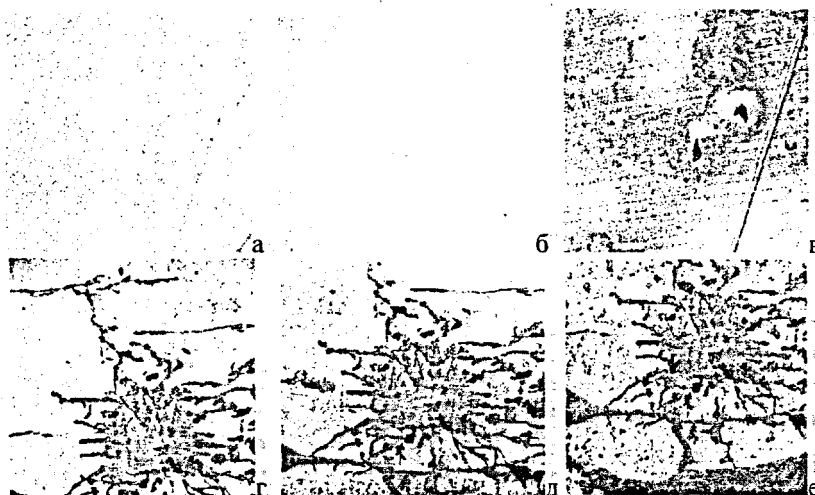


Рис. 3 Микрофотографии поверхности пирита до и после электрохимической обработки в среде H_2SO_4 : а) до обработки, б) 2ч обработки, в) 8ч обработки и арсенипирита (светлое) после обработки в среде H_2SO_4 : г) до обработки, д) 2ч обработки, е) 8ч обработки.

Ширина поля 0,5мм.

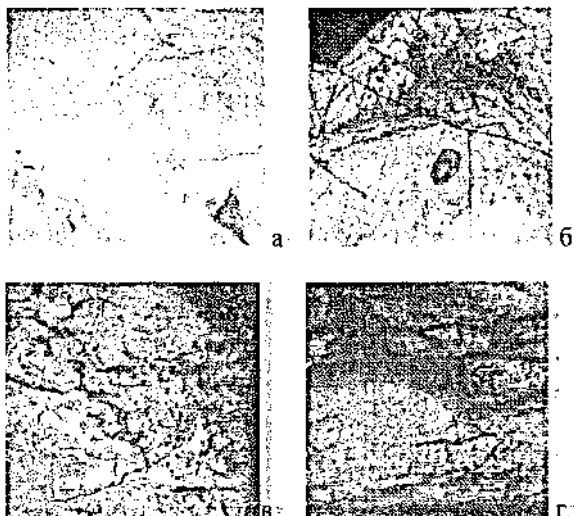


Рис. 4 Микрофотографии поверхности пирита после электрохимической обработки в среде NaOH: а) 2ч обработки, б) 8ч обработки и арсенипирита после электрохимической обработки в NaOH: в) 2ч обработки; д) 8ч обработки. Ширина поля 0,5мм.

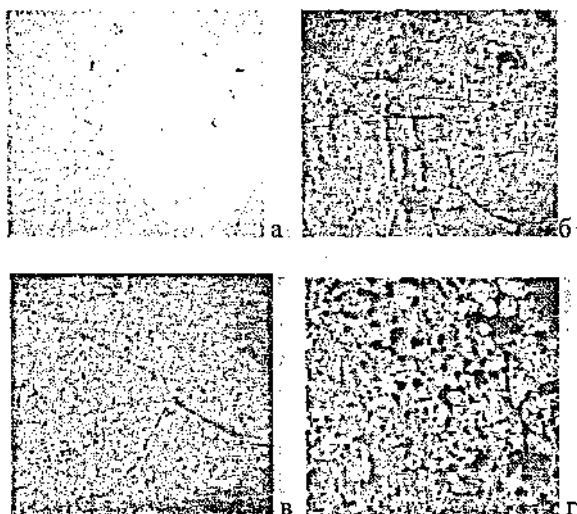


Рис. 5 Микрофотографии поверхности пирита с различной исходной шероховатостью после электрохимической обработки в среде NaOH: а) исходный отполированный, б) после 8ч обработки, в) исходный грубо отшлифованный, г) после 8ч обработки. Ширина поля 0,5мм

Из сравнения микрофотографий аншлифа установлено, что на шероховатой поверхности рельеф и возрастание дефектности более значительно (рис.5г), чем на гладкой (рис.5б).

При рассмотрении с помощью сканирующего электронного микроскопа поверхности арсенопирита, электрохимически обработанного в 0,5н NaOH (рис.6), было отмечено образование округлых пор различного диаметра и развитой сети трещиноватости. Благодаря этому, без дополнительной дезинтеграции происходит значительное увеличение удельной поверхности сульфидов и повышение проницаемости.

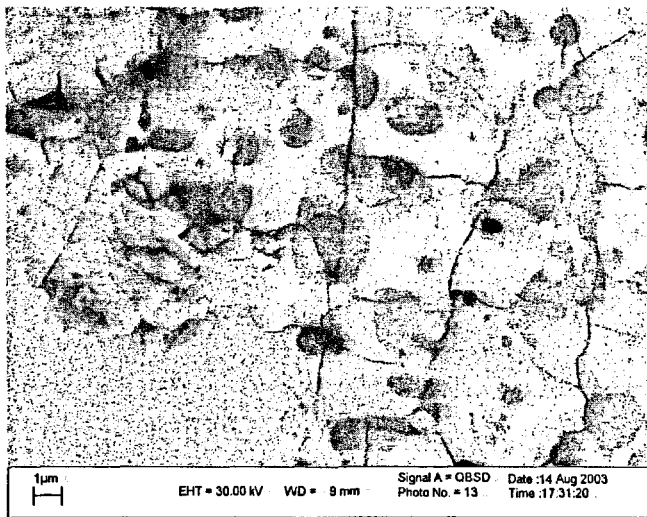


Рис. 6. Микрофотография поверхности арсенопирита после электрохимической обработки в среде NaOH (изображение получено на сканирующем электронном микроскопе Leo-1430). Ширина поля 0,015 мм.

Методом компьютерного анализа изображений впервые исследовано изменение формы частиц золотосодержащих пирита и арсенопирита в процессе их электрохимического вскрытия. В качестве характеристик формы использовались: 1) округлость (O) - величина, равная отношению площади силуэта частицы (S) к квадрату его периметра (P): $O = 4\pi S/P^2$ и 2) форм-фактор (Ff), определяемый как отношение площади описанного вокруг частицы минимального прямоугольника к площади силуэта частицы. По результатам анализа исходных морфометрических характеристик установлено, что средняя округлость поверхности у пиритов изменяется в диапазоне 0,58-0,81, у арсенопиритов 0,58-0,6, форм-фактор от 1,5 до 1,63 у пиритов, для арсенопиритов 1,48-1,49. Большая несовершенство кристаллической решетки арсенопиритов из-за наличия атомов мышьяка по сравнению с пиритами отражается на облике минеральных зерен. Средняя округлость поверхности

пиритов 0,71, арсениопиритов 0,59. Средний показатель форм-фактора у пиритов составляет 1,57, у арсениопиритов 1,49, низкие значения которых, указывают на их несовершенную форму.

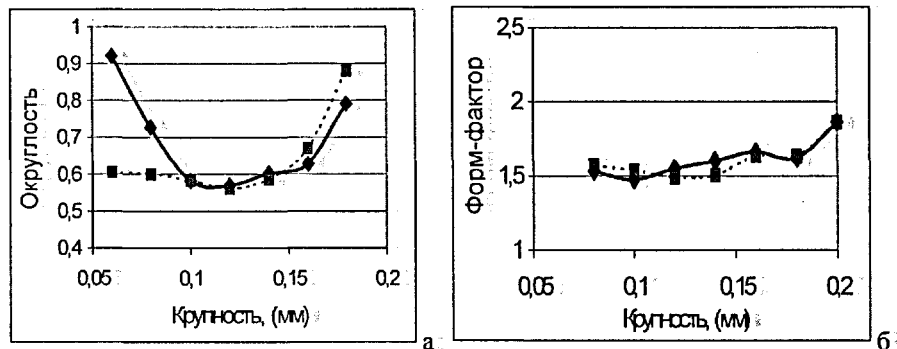


Рис. 7. Изменение морфометрических характеристик обломков сульфидных зерен пирита и арсениопирита до и после безреагентной электрохимической обработки: а) округлость $\sigma=0,0019$; $p=0,95$; $n=1000$, б) форм-фактор $\sigma=0,0108$; $p=0,95$; $n=1000$. До обработки - сплошная линия, после обработки - пунктирная линия.

Из графиков на рис.7 следует, что наибольшему относительному изменению средней округлости при электрохимической обработке подвержены тонкие классы крупности -80 мкм, на которые приходится наибольшее число частиц. Форм-фактор зерен практически не изменяется при электрохимической обработке.

Таким образом, округлость класса -80 мкм может являться наиболее значимым показателем изменения рельефа поверхности сульфидного обломка при электрохимической обработке. Разница в округлости исходных подготовленных к обработке зерен, объясняется различным генезисом, структурой, наличием примесей, а также микродефектов, полученных на стадии рудоподготовки.

Изменения морфометрии золотоносных сульфидов при различных видах электрохимической обработки были исследованы на образцах физически упорного гравитационного концентрата из руды Нежданнинского месторождения. После вскрытия основная часть навески направлялась на цианирование, а из остатка изготавливались аншлифы для последующего анализа, результаты которого приведены в табл. 3. Отмечается, что наибольшее вскрытие происходит при комбинированной химико-электрохимической обработке в среде NaOH. Величина извлечения золота из концентрата коррелирует с возрастанием округлости тонких сульфидных частиц, форм-фактор при этом изменяется в меньшей степени. Изменения структуры, фазового состава и физико-химических характеристик сульфидов железа и мышьяка в процессе их электрохимической и комбинированной

обработок приводят к интенсификации процесса цианидного извлечения золота в раствор.

Таблица 3.

Результаты вскрытия при различных видах обработки.

| Вид обработки | Извлечение Au, (%) | Округлость (класс -80мкм) | Форм-фактор |
|---|--------------------|---------------------------|-------------|
| 1. Без обработки (исходный) | 52,8 | 0,758 | 1,488 |
| 2. Химическая в 0,5 н H ₂ SO ₄ , 8ч | 54,2 | 0,721 | 1,805 |
| 3. Химическая в 0,5 н NaOH, 8ч | 61,3 | 0,654 | 1,611 |
| 4. ЭХО безреагентная, 8ч | 56,8 | 0,711 | 1,409 |
| 5. ЭХО в 0,5 н H ₂ SO ₄ , 8ч | 61,3 | 0,670 | 1,476 |
| 6. ЭХО в 0,5 н NaOH, 8ч | 71,9 | 0,588 | 1,681 |

С применением анализатора изображений установлено, что после электрохимической обработки у арсенопиритов, в отличие от пиритов, наблюдается перераспределение зерен: в сторону уменьшения их форм-фактора. При электрохимической обработке арсенопиритов существенно изменяется как округлость поверхности, так и форм-фактор.

Учитывая полученные результаты, а также - принимая во внимание эффективность и технологию процесса цианирования, наиболее рационально проводить дальнейшие исследования режимов вскрытия для случая электрохимической обработки концентрата в среде NaOH. В этих опытах в качестве регулируемой величины принималась продолжительность электрохимического воздействия. На основе сопоставления результатов в разных режимах (табл. 4) видно, что наиболее эффективна (по отношению затрат на дополнительный прирост извлечения) кратковременная обработка. На результаты процесса также влияет крупность материала, так более высокие показатели процесса цианирования получены из класса -60 мкм. В опыте 3, в отличие от остальных, обработка велась в открытом цикле, что позволило повысить извлечение на 2%, однако за счет некоторого увеличения затрат на реагенты.

Большая растворимость высокозолотоносного арсенопирита по сравнению с пиритом отмечается как по данным изменения округлости его частиц, так и химического анализа раствора выщелачивания. Избирательное действие электрического тока на смесь сульфидов заключается в преимущественном воздействии на более электропроводные зерна арсенопирита.

Таблица 4.

Режимы и результаты электрохимической обработки различных упорных золотосодержащих продуктов:

| №: | Месторождение | Время, ч | Плотность тока, а/п | Окружность сульфидов: | | Извлечение золота, % |
|----|---------------|----------|---------------------|-----------------------|-------|----------------------|
| | | | | FeS ₂ | FeAsS | |
| 0 | Нежданинское | 0 | - | 0,770 | 0,675 | 57,5 |
| 1 | Нежданинское | 4 | 2,5 | 0,690 | 0,593 | 81,7 |
| 2 | Нежданинское | 12 | 4 | 0,675 | 0,579 | 82,0 |
| 3 | Нежданинское | 20 | 4 | 0,669 | 0,555 | 83,9 |
| 4 | Нежданинское | 24 | 4 | 0,653 | 0,537 | 84,4 |
| 5 | Ветренское | 0 | - | 0,752 | 0,468 | 79,9 |
| 6 | Ветренское | 4 | 4 | 0,713 | 0,414 | 85,6 |

Во всех случаях установлено возрастание округлости обломков сульфидных зерен, причем эффект наиболее значителен в первый период обработки, на что указывает пропорциональное увеличение извлечения золота. На рис. 8 проиллюстрировано изменение округлости зерен сульфидов и соответствующее извлечение золота из концентрата. Наличие корреляции между двумя этими величинами позволяет применить данный параметр в качестве критерия для предварительной экспрессной оценки эффективности вскрытия.

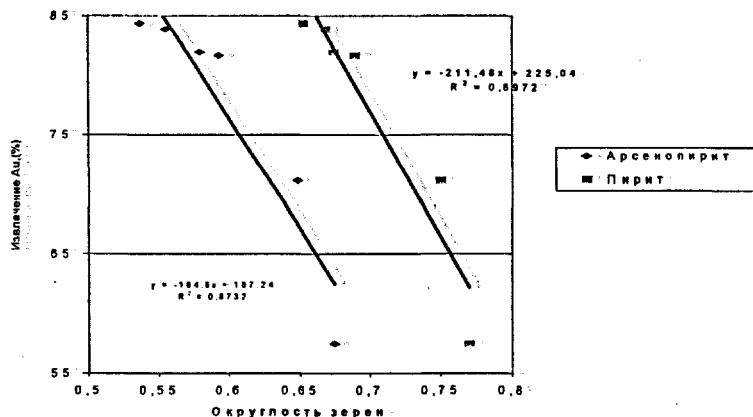


Рис.8. Зависимость извлечения золота из сульфидного концентрата от округлости поверхности частиц золотосодержащих пирита и арсенипирита

На основе данных, представленных на рис. 9, можно оценить относительную эффективность энергозатрат на предварительное электрохимическое вскрытие.

На графике видно падение эффективности вскрытия в начальный период. После продолжительной обработки эффективность процесса стабилизируется на минимальном уровне, что позволяет предположить протекание процесса в стационарном режиме.

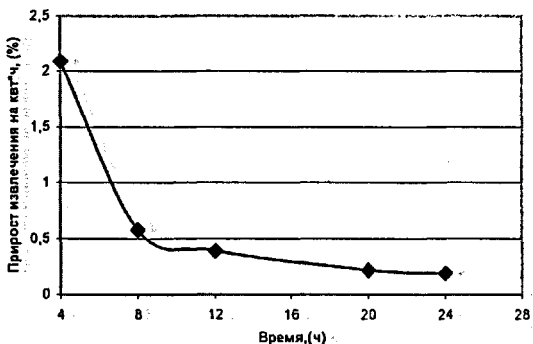


Рис. 9. Зависимость энергетической эффективности электрохимической обработки нежданнинского концентрата от продолжительности воздействия.

Максимальный; приrost извлечения, достигается при длительной электрохимической обработке и определяется технологическими, а главное экономическими факторами: содержанием ценного компонента, его стоимостью и ценой электроэнергии. Удельные энергозатраты на обработку в течение 8ч составили $12 \text{ кВт} \cdot (\text{ч} \cdot \text{т})^{-1}$ и расход $\text{NaOH } 2 \text{ кгт}^{-1}$.

Выводы.

1. Установлена стадийность процесса разупрочнения пиритов и арсенипиритов, содержащих тонкодисперсное золото при электрохимическом воздействии. Процесс разрушения кристаллической структуры сульфидов протекает в два этапа:

- интенсификация растворения поверхностных пленок и механически активированных дефектов,

последующее развитие поверхности за счет вскрытия естественных структурных несовершенств, обусловленное выщелачиванием очищенной поверхности. В процессе электрохимического выщелачивания сульфиды железа переходят в рыхлый гидроксид $\text{Fe}(\text{OH})_3$, обладающий пористой структурой, легкодоступной для цианистых растворов.

2. Впервые для оценки изменений морфометрических параметров сульфидных частиц в процессе электрохимической обработки был применен метод оптико-геометрического анализа изображений. На основе анализа

данных изменения размеров и формы золотосодержащих сульфидных частиц пирит-мышьяковистого гравитационного концентрата доказано наличие двух основных факторов, обеспечивающих их вскрытие в процессе электрохимической обработки: дезинтеграция крупных минеральных агрегатов и развитие структурных несовершенств (пор и микротрещин).

3. Экспериментально показано, что для оценки стадиальности процесса вскрытия золотосодержащих сульфидов при электрохимическом воздействии наиболее рационально использовать такой морфометрический параметр минеральных частиц как округлость, т.к. он существенно коррелирует с извлечением золота в продуктивный раствор при цианировании и, тем самым, отражает степень физического вскрытия.

4. Примененный в исследованиях комплекс морфометрических характеристик минеральных агрегатов (округлость, форм-фактор) в дальнейшем может быть расширен и послужит основой для создания методики определения эффективности различных энергетических воздействий, используемых для вскрытия упорных золотосодержащих продуктов перед цианированием. Числовые морфометрические данные в сочетании с измерениями оптических свойств рудных минералов позволяют оценить возможность применения анализаторов изображения в практике исследования и контроля процессов вскрытия.

5. Избирательность действия электрохимической обработки на минералы заключается в преимущественной концентрации токов на более проводящих минералах (в местах включений золота и серебра), что по данным электрофизических измерений будет способствовать более интенсивному протеканию электрохимических процессов на арсенопирите, удельная электропроводность которого выше в несколько раз, чем у пирита.

6. В результате укрупненных лабораторных испытаний электрохимической технологии вскрытия упорных золотосодержащих продуктов было установлено: при базовом уровне извлечения золота - 57,9% (Нежданинский гравитационный концентрат) повышение извлечения золота на 21,3-26,5%. На примере гравитационного концентрата из руд Ветренского месторождения извлечение возросло на 5,7%. Показатели были достигнуты при объемной плотности тока 4 А/л, при концентрации щелочи (NaOH) - 3 % и времени электрохимической обработки 24 часа.

7. Электрохимическая технология вскрытия золотосодержащих сульфидов открывает перспективу создания современной технологии переработки упорных золотосодержащих руд и продуктов их обогащения в вариантах кучного и чанового химико-электрохимического выщелачивания.

Опубликованные по теме диссертации работы:

1. Чантурия В.А., Федоров А.А., Чекушина Т.В./, Зверев И.В., Зубенко А.В. Электрохимическая интенсификация? процесса вскрытия упорных золотосодержащих руд //Горный журнал, 1997, №10, стр.51-55.
2. Федоров А.А., Бунин И.Ж., Чекушина Т.В., Зубенко А.В. Изменение физико-химических и технологических свойств упорных; пирит-мышьяковистых концентратов в процессе их электрохимического вскрытия. - Горный информационно-аналитический бюллетень. М: МГТУ, 1999, №3, стр. 134-136..
3. Федоров А.А., Зубенко А.В. Влияние энергетических воздействий на оптико-геометрические характеристики пиритов различных месторождений. - Горный информационно-аналитический бюллетень М: МГТУ, 2001 №7, стр.100-101
4. Зубенко А.В. Влияние вещественного состава и структурных особенностей и сульфидных руд на эффективность их электрохимического вскрытия// Проблемы освоения недр в XXI веке- глазами молодых. Материалы I международной. конференции; молодых ученых и специалистов. - Москва, Ин-т проблем комплексного освоения недр РАН, 2002, стр.111-113.
5. Чантурия В.А., Федоров А.А., Матвеева Т.Н., Зубенко А.В., Ланцова Л.Б. Оценка взаимосвязи элементного состава примесей, электрофизических, электрохимических и флотационных свойств золотосодержащих пиритов. Геохимия, 2000, №11, стр.1165-1169-
6. Chanturiyai V.A., Fedorov A.Ai, Matveyeva T.N., Zubenko A.V. Comprehensive study of auriferous sulphides, properties for their technological characteristics forecasting. Proc. of the 7th International Conference of Mining, Petroleum and Metallurgical Engineering. Vol2 Assiut University. Egypt 2001, - p.28-36
7. Зубенко А.В.* Исследование режимов; электрохимического* вскрытия упорных золотосодержащих руд//Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогашения; полезных ископаемых (Плаксинские чтения). Материалы Международного совещания. - М.: Альтекс, 2003, стр.57.



Лицензия ЛП № 21037 от 08 февраля 1996 г. Подписано в печать с оригинал-макета 19.02.2004 г. Формат 60x84 1/16. Бумага «Future multitech». Печать офсетная. Набор компьютерный. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. заказ № 99.

Издание ИПКОН РАН

111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4.

- 3320