

На правах рукописи



ГУРИН Константин Константинович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ
ЗОЛОТА ИЗ ОТХОДОВ ЗОЛОТОИЗВЛЕКАТЕЛЬНЫХ ФАБРИК**

Специальность 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель:

Стрижко Леонид Семенович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Седельникова Галина Васильевна

доктор технических наук, профессор,
Центральный научно-исследовательский
геологоразведочный институт цветных и
благородных металлов (ФГУП ЦНИГРИ,
г. Москва), зам. генерального директора
по технологиям обогащения
минерального сырья

Журавлев Валерий Иванович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
НИТУ «МИСиС» г. Москва,
ведущий эксперт

Ведущая организация

Национальный исследовательский
«Иркутский государственный
технический университет»
(НИ «ИрГТУ») г. Иркутск

Защита диссертации состоится «28» мая 2013 года в 16⁰⁰ в аудитории К-212 на заседании диссертационного совета Д.212.132.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д. 3.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС».

Отзывы на автореферат отправлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, НИТУ «МИСиС», ученому секретарю совета Лобовой Т.А.

Автореферат разослан « » апреля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Лобова Т.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. За последние десятилетия в золотодобывающей отрасли отмечается сокращение геологических изысканий месторождений, дефицит качественного сырья за счет резкого сокращения легкодоступных запасов золота в коренных рудах и россыпях, истощение резервных запасов рудной базы в целом, что отрицательно сказывается на объеме производства золота. Сокращение рудной базы привело к остановке ряда металлургических предприятий Сибири и Забайкалья, и это ставит перед специалистами задачу по вовлечению в производство других источников сырья.

Интенсивное развитие золотодобывающей промышленности в предыдущие десятилетия привело к накоплению больших объемов техногенных отвалов, в которых содержится 0,5-2,3 г/т золота. Недоизвлечение ценных компонентов объясняется несовершенством технологий извлечения золота из рудного сырья, таких как гравитация, амальгамация, перколяция. Некоторые хвостохранилища в настоящее время можно рассматривать как отдельные месторождения.

Ресурсный потенциал техногенных золотосодержащих отвалов на территории России велик и его рациональное использование будет способствовать дальнейшей стабилизации рудной базы золотодобывающей промышленности.

За рубежом отвалы золотоизвлекательных фабрик вовлекаются в повторную переработку, в частности в ЮАР, где годовая производительность по извлечению золота из отвалов составляет 3-5 тонн. Технология предусматривает доизмельчение материала и последующее выщелачивание золота. В России наиболее значимыми объектами для доизвлечения золота являются отвалы золотоизвлекательных фабрик объединения Балеизолото, в которых содержится до 4 г/т золота.

Один из наиболее перспективных вариантов – это переработка золотосодержащих отвалов на действующем модернизированном горнометаллургическом предприятии ОАО «Покровский рудник», работающем с 1999 года на сырье Покровского месторождения, расположенного в Амурской

области.

В связи с тем, что вновь осваиваемое природное сырье, а также лежалые отвалы отличаются более низким содержанием золота и трудновскрываемой формой нахождения золота, для их переработки необходимо привлечение существующих современных интенсификационных методов процесса выщелачивания с применением ультразвуковой, магнитно-импульсной и гидроакустической обработки.

Цель работы. На основе физико-химических исследований причин потерь золота при цианировании разработать способ доизвлечения его из отвалов переработки упорных золотосодержащих руд смешанного типа фабрики ОАО «Покровский рудник».

Основные задачи исследований:

- изучить химический, минералогический и вещественный состав исходной руды и отвалов от её переработки с целью определения причин потерь золота;
- исследовать влияние предварительной ультразвуковой обработки отвалов на повышение извлечения золота вследствие разрушения минеральных агрегатов и поверхностных пленок;
- изучить механизм разупрочнения порообразующих минералов, содержащих золото в тонковкрапленном виде и в виде сростков с сульфидными минералами, и физико-химические закономерности растворения золота в цианидных и тиомочевинных растворах при магнитно-импульсной обработке.
- исследовать кинетику цианидного выщелачивания золота из отвалов с применением гидроакустического воздействия;
- разработать процесс извлечения золота из отвалов с применением гидроакустического воздействия, обеспечивающего повышение концентрации кислорода в пульпе и дополнительное измельчение материала, с последующим проведением опытно-промышленных испытаний на ОАО «Покровский рудник».

Методы исследований: для оптических исследований использован поляризационный микроскоп ECLIPSE LV100-POL, минералогический состав

изучен с использованием оптического стереомикроскопа SMZ-1500, рентгеноспектральный микроанализ минералов выполнен на электронно-зондовом аналитическом комплексе «Superprobe-8100» (Jeol, Япония), химический анализ на золото выполнен на приборе INKA-400 (Великобритания). Гранулометрический анализ выполнен мокрым и сухим способом с применением сит ГОСТ 3584-72.

Содержание золота и примесей определяли с применением атомно-абсорбционного спектрофотометра AA-6300 SHIMADZU (Япония) и пробирным анализом.

Научная новизна работы:

1. Комплексом физико-химических исследований установлена упорность золота к цианидному выщелачиванию из отвалов, показавшая, что нерастворимое золото ассоциировано с сульфидными минералами (45,6%), оксидами, карбонатами, гидроксидами железа (17,6%) и породообразующими минералами (14,7%).

2. Установлены физико-химические закономерности цианидного выщелачивания отвалов золотоизвлекательной фабрики с применением гидроакустического воздействия за счет повышения концентрации кислорода с 3-5 мг/л до 12-14,5 мг/л и доизмельчения твердой фазы пульпы до класса -0,02 мм с 35,4% до 58,2%, что привело к повышению извлечения золота до 94,6%.

3. Разработана динамическая математическая модель, которая позволяет в реальном масштабе времени прогнозировать неизмеряемые показатели растворения золота и серебра, расход цианида и дает возможность реализовать систему управления, поддерживающую постоянную концентрацию цианида, кислорода и отношение жидкого к твердому.

Практическая значимость работы.

1. Экспериментально определены оптимальные технологические параметры процесса, обеспечивающие переход 95,5% золота в раствор: время выщелачивания при гидроакустическом воздействии - 6 часов; концентрация кислорода - 12-12,5 мг/л; концентрация цианида и щелочи - 0,06 и - 0,1 % соответственно.

2. Разработанная технология извлечения золота с применением гидроакустических излучателей может быть использована при цианировании золотосодержащих руд и концентратов. Предложена принципиальная технологическая схема переработки отвалов ОАО «Покровский рудник» с применением гидроакустических излучателей в процессе цианирования. По результатам проведения опытно-промышленных испытаний рекомендовано использование предложенной технологии в действующем производстве. Ожидаемый экономический эффект внедрения технологии составит 315 рублей на 1 тонну перерабатываемых отвалов.

На защиту выносятся:

- результаты изучения минералогического состава хвостов цианирования и обоснование причин потерь золота с ними;
- результаты исследования влияния ультразвукового, магнитно-импульсного, гидроакустического воздействия на цианидное выщелачивание золотосодержащих отходов, позволяющее увеличить долю цианируемого золота;
- результаты кинетических исследований цианидного выщелачивания при гидроакустическом воздействии и предложенный механизм процесса растворения золота;
- результаты укрупненно-лабораторных и опытно-промышленных испытаний процесса выщелачивания при воздействии гидроакустических колебаний и предлагаемая технологическая схема переработки отвалов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011» (Одесса, 2012), на международных конференциях: «Sciences, Technology and Higher Education» (Canada, 2012) и «Sciences, Technology and Higher Education» (Germany, 2012).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в журналах рекомендуемых ВАК - 3, учебном пособии - 1, в сборниках тезисов докладов - 3, всего печатных работ - 7, ноу-хау - 1.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных источников и приложения. Работа изложена на 149 страницах, содержит 20 таблиц, 45 рисунков и 105 использованных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе представлен аналитический обзор опубликованных данных и научных исследований по состоянию базы техногенного золотосодержащего сырья в России, степени готовности его к эксплуатации, а также технологической и экономической обоснованности переработки низкосортного сырья.

Показано разнообразие объектов вторичного сырья по происхождению, содержанию металлов, масштабам и экономической значимости. Техногенные объекты рассмотрены с точки зрения потребительской стоимости и одновременно как загрязнители окружающей среды, подлежащие утилизации.

Обоснована целесообразность вовлечения отвалов в эксплуатацию на предприятиях, недостаточно обеспеченных рудной базой, а также обладающих технологией, пригодной для переработки рудного сырья и отвалов.

Оценено современное состояние технологической базы для переработки золотосодержащего рудного и техногенного сырья с учетом последних запатентованных разработок. Однако предлагаемые технологии непригодны для лежалых отвалов из-за их упорности.

На основании критической оценки имеющихся опубликованных данных сформулированы задачи для решения важной технической проблемы разработки интенсификационной энергосберегающей технологии для вовлечения в производство лежалых золотосодержащих отходов ОАО «Покровский рудник».

Во второй главе представлены результаты исследований по выявлению причин потерь золота с хвостами цианирования при переработке упорных руд смешанного типа золотоизвлекательной фабрики ОАО «Покровский рудник». С этой целью изучены особенности вещественного состава хвостов с применением

визуальных и оптических минералогических исследований; методов ситового, спектрального полуколичественного, химического, фазового, нейтронно-активационного и пробирного анализов; рентгеноспектрального микроанализа с кристалл-дифракционным и энерго-дисперсионным окончанием.

Установлено, что исходная руда и хвосты цианирования по химическому составу различаются незначительно. Основным компонентом в руде и хвостах остается диоксид кремния (71,75 и 72,13%), вторым по значимости является оксид алюминия (9,80 и 8,97%). Содержание цветных металлов составляет сотые (свинец) и тысячные (медь и цинк) доли процентов. Из вредных примесей присутствует мышьяк (0,058 и 0,056%). Содержание золота в руде - 3,60 г/т, в хвостах - 0,50-0,70 г/т. Наиболее значимым изменением состава хвостов цианирования по сравнению с исходной рудой является увеличение количества оксидного и уменьшение закисного железа, а также возрастание количества серы сульфатной с 0,1 до 0,36%.

Минералогическим анализом выявлено, что хвосты состоят из пороодообразующих минералов, основными из которых являются кварц (53,50%), калиевый полевой шпат (14,50%), серицит (13,40%), карбонаты (10,40%). Рудных минералов в пробе около 3%, среди них преобладают пирит (1,07%), гематит и гидроксиды железа (в сумме 1,20%) (рисунки 1А и 1Б). Самородное золото не визуализировано, его содержание в различных продуктах гравитационно-магнитного фракционирования и классификации колеблется от 0,5 до 86 г/т, что, скорее всего, свидетельствует о тонкодисперсной форме его нахождения.

А



Б

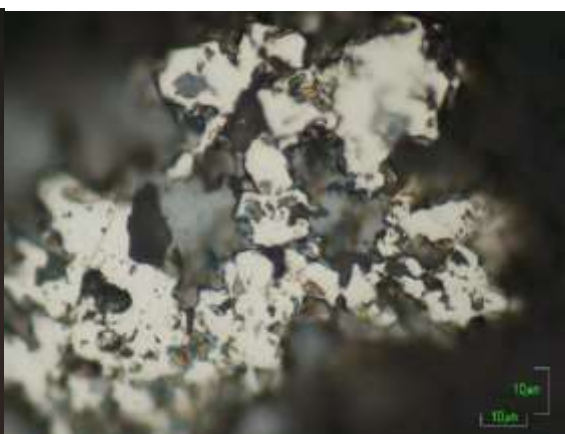


Рисунок 1А - Выделение коллоидного пирита в карбонате.

Рисунок 1Б - Выделения гидроксидов железа (голубовато-серое) в пористом пирите (белое).

Фазовый анализ на золото выполнен по методике, используемой в «Иргиредмет», на пробе с крупностью материала 95-96% класса (-0,074 мм).

Таблица 1 - Результаты фазового анализа отвалов на золото

Форма нахождения золота и характер его связи с рудными и породообразующими компонентами	Содержание золота	Распределение золота
	г/т	%
Свободное (извлекаемое амальгамацией)	0,03	4,4
В виде сростков (цианируемое)	0,08	11,8
Всего в цианируемой форме	0,11	16,2
Извлекаемое цианированием после обработки щёлочью (ассоциированное с аморфным кремнезёмом, заключенное в поверхностные пленки)	0,04	5,9
Извлекаемое цианированием после обработки соляной кислотой (ассоциированное с оксидами и гидроксидами железа, карбонатами и др.)	0,12	17,6
Извлекаемое цианированием после обработки азотной кислотой (ассоциированное с сульфидами железа)	0,31	45,6
Тонковкрапленное в породообразующие минералы	0,10	14,7
Всего в пробе (по балансу)	0,68	100,0

Определение содержания золота проводилось пробирным методом с химическим окончанием. В таблице 1 приведены результаты фазового анализа хвостов цианирования ОАО «Покровский рудник».

Полученные данные свидетельствуют о том, что упорность хвостов к цианидному выщелачиванию, в основном, обусловлена тесной ассоциацией золота с сульфидами железа (45,6 %), а также его ассоциацией с минералами, растворимыми в соляной кислоте – карбонатами, гидроксидами железа и др. (17,6%), тонкой вкрапленностью в порообразующие минералы (14,7%) и, в меньшей степени, с наличием пленок на поверхности золотин (5,9%).

Гранулометрический состав хвостов представлен в таблице 2.

Гранулометрический состав хвостов определяется по стандартной методике с набором сит, имеющих следующий размер ячеек: 0,5; 0,25; 0,1; 0,044 мм. Поскольку выход шламового класса крупности -0,044+0 мм значителен, шламы подвергались седиментационному анализу по крупности 0,020 и 0,010 мм.

Таблица 2- Гранулометрический состав хвостов

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание		Распределение, %	
		Au, г/т	As, %	Au	As
-0,5+0,25	0,18	3,40	0,08	0,72	0,20
-0,25+0,10	11,32	0,75	0,03	10,06	4,63
-0,10+0,044	34,60	0,60	0,05	24,59	23,58
-0,044+0,020	18,50	1,80	0,15	39,46	37,82
-0,020+0	35,40	0,60	0,07	25,17	33,77
Итого	100,00	0,84	0,07	100,00	100,00

По данным гранулометрического анализа основная масса материала имеет крупность менее 0,1 мм (88,50%). Максимальное содержание золота, равное 3,4 г/т, отмечено во фракции крупности -0,5+0,25 мм, следующим по содержанию золота – 1,8 г/т является фракция крупности -0,044+0,020 мм. В эти классы распределяется 0,72% и 39,46% золота при выходе 0,18% и 18,50%, соответственно. Тот факт, что золото обнаружено в крупных фракциях, свидетельствует о присутствии в исходной руде золота различной крупности.

По результатам физико-химической характеристики сырья сделаны следующие выводы о причинах потерь золота при прямом цианировании:

-наличие крупного золота, которое не успевает раствориться в процессе цианирования;

-наличие тонкого золота, заключенного в сульфидах и аморфном кремнеземе, нераскрытого в процессе рудоподготовки;

-наличие тонкого золота, ассоциированного с оксидами и гидроксидами железа;

- наличие тонковкрапленного золота в породообразующих минералах;

- высокое содержание материалов с высокой сорбционной активностью (карбонаты, хлорит, слюды, ярозит).

С целью доизвлечения золота, заключенного и ассоциированного в минеральные зерна, проведены исследования по применению ультразвуковой обработки в процессе выщелачивания.

Исследования выполнены на пульпе в процессе цианидного выщелачивания на пилотной ультразвуковой установке. Техническая характеристика установки: частота ультразвуковых колебаний – $20 \pm 1,65$ кГц, число ультразвуковых излучателей -12 штук, напряжение питания – 380/50 В/Гц, потребляемая мощность оборудования – не более 1,0 кВт, режим работы – непрерывный. Режимные характеристики ультразвуковой обработки определялись исходя из имеющегося опыта и вещественного состава исследуемого продукта: угол наклона лотка - 10^0 , расход воды – 4 л/мин, ж: т= 3:1. Эффективность ультразвукового воздействия определялась результатами фазового анализа на золото, выполненного на продуктах после ультразвуковой обработки (таблица 3), а так же сравнением с фазовым анализом исходных хвостов (таблица 1).

Результаты сравнения показывают, что при ультразвуковой обработке отвалов с последующим цианированием извлекается золота до 28,8%: из них на долю свободного золота приходится - 6,9%, из сростков - 21,8%. В целом приведенные данные позволяют сделать вывод о положительном влиянии ультразвука. После его воздействия извлекается прямым цианированием на 12,6% золота больше, чем без воздействия.

Однако следует отметить, что в результате ультразвуковой обработки происходит неполное вскрытие минералов, чем объясняется низкое извлечение золота. Таким образом, ультразвуковая обработка способствует разрушению

наименее прочных минеральных агрегатов и освобождению из них мелкого золота, разрушению поверхностных пленок с раскрытием заключенного в них золота и перераспределению золота в более крупные классы за счет сохранения наиболее прочных сростков, что приводит к повышению извлечения золота с 16,2% до 28,8%. Однако эти результаты не могут быть приняты в производстве из-за недостаточной эффективности.

Таблица 3 - Результаты распределения золота после ультразвуковой обработки

Форма нахождения золота и характер его связи с рудными и породообразующими компонентами	Содержание золота	Распределение золота
	г/т	%
Свободное (извлекаемое амальгамацией)	0,05	6,9
В виде сростков (цианируемое)	0,16	21,8
Всего в цианируемой форме	0,21	28,8
Извлекаемое цианированием после обработки щёлочью (ассоциированное с аморфным кремнезёмом, заключенное в поверхностные пленки)	0,02	2,7
Извлекаемое цианированием после обработки соляной кислотой (ассоциированное с оксидами и гидроксидами железа, карбонатами и др.)	0,19	26,0
Извлекаемое цианированием после обработки азотной кислотой (ассоциированное с сульфидами)	0,25	34,3
Тонковкрапленное в породообразующие минералы	0,06	8,2
Всего в пробе (по балансу)	0,73	100,0

Как следует из таблицы 2, основная часть нескрытого золота находится в сульфидных минералах (45,6%). Из сульфидных минералов преобладающим является пирит. Известно, что пирит и магнетит являются магнитовосприимчивыми минералами. С целью вскрытия золота, проведены исследования с применением известного метода магнитно-импульсной обработки, который способствует разрушению магнитовосприимчивых минералов и в конечном итоге приводит к повышению извлечения золота.

В третьей главе рассмотрен магнитно-импульсный метод обработки (МИО) применительно к отвалам ОАО «Покровский рудник» с целью повышения извлечение золота.

Использование магнитно-импульсной обработки позволяет увеличить выход тонкого класса, повысить извлечение ценного компонента в процессе растворения, а также снизить энергоемкость измельчения. Магнитно-импульсная обработка основана на разупрочнении минеральных комплексов, окислении железа, что приводит к дополнительному вскрытию золота. Установлено, что под воздействием электромагнитного поля, создаваемого магнитно-импульсной обработкой, минеральная поверхность материала становится рыхлой и пористой, на ней появляются зоны окисления минералов.

Проведены эксперименты по изучению влияния продолжительности предварительной магнитно-импульсной обработки при величинах импульса электромагнитного поля - 30 и 3000 импульсов в минуту на степень извлечения золота при последующем выщелачивании в цианидных растворах (рисунок 2).

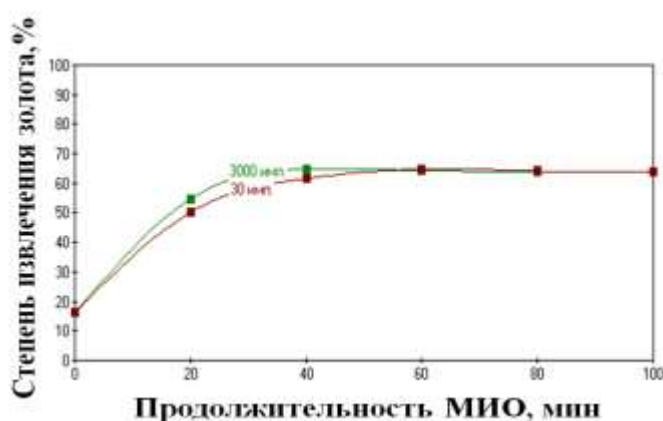


Рисунок 2 – Зависимость извлечения золота от продолжительности предварительной магнитно-импульсной обработки

Сравнительный анализ результатов исследований свидетельствует о наибольшем эффекте повышения извлечения золота при количестве импульсов электромагнитного поля в минуту равном 3000.

С увеличением продолжительности предварительной магнитно-импульсной обработки до 40 секунд наблюдается увеличение извлечения золота при последующем цианировании отвалов. При дальнейшем увеличении времени предварительной магнитно-импульсной обработки (до 100 секунд), наблюдается снижение извлечения золота с 64,8% до 63,7%. Это объясняется тем, что увеличение времени приводит к уплотнению материала за счет закупорки микротрещин и пор.

Проведены исследования по изучению влияния магнитно-импульсной обработки на изменение гранулометрического состава отвалов (рисунок 3).

Из рисунка 3 видно, что под действием импульсного магнитного поля содержание класса крупности $-0,5+0,25$ уменьшается в 4 раза (от 0,18% до 0,04%) и увеличивается выход материала крупностью $-0,02$ мм. Это свидетельствует о том, что положительный эффект влияния предварительной магнитно-импульсной обработки применительно к жидкой пульпе значительно проявляется на более крупном классе.

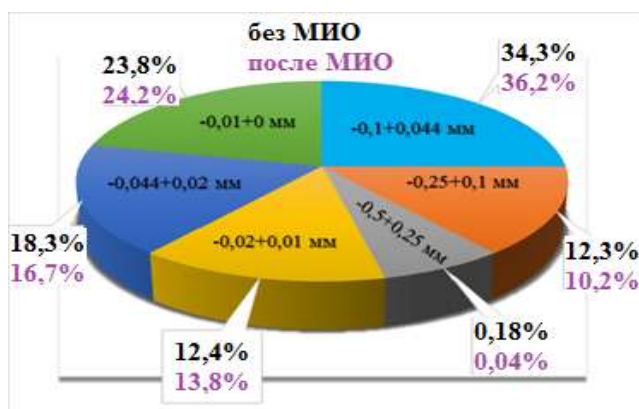


Рисунок 3 - Сравнительные результаты гранулометрического анализа хвостов цианирования с применением МИО и без МИО

На рисунке 4 приведены кривые выщелачивания золота при прямом цианировании, цианировании после магнитно-импульсной обработки, цианировании в процессе магнитно-импульсной обработки и тиомочевинное растворение после магнитно-импульсной обработки, при продолжительности 48 часов.

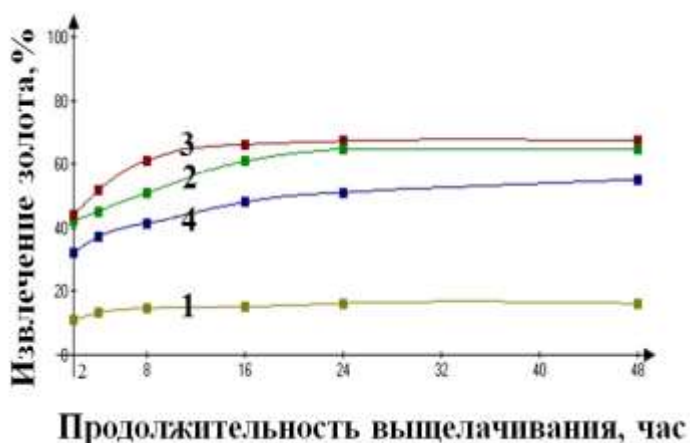


Рисунок 4 - Зависимость извлечения золота от продолжительности выщелачивания. 1 – прямое цианирование; 2 - цианирование с предварительной МИО; 3 - МИО в процессе цианирования; 4 – тиомочевинное выщелачивание после МИО

Полученные результаты свидетельствуют о том, что равновесие в системе достигается за 24 часа цианирования как с применением магнитно-импульсной обработки, так и без нее, а в случае применения в качестве растворителя тиомочевины - за 48 часов. Извлечение золота в цианидных растворах после предварительной магнитно-импульсной обработки (2) составляет 64,8%. Более

высокое извлечение золота достигается с применением магнитно-импульсной обработки в процессе выщелачивания (3), где извлечение повышается до уровня 67,2%. Это связано с тем, что электромагнитное поле способствует проникновению цианид иона в микротрещины и поры, что приводит к увеличению степени растворимости золота.

Предварительная магнитно-импульсная обработка с последующим выщелачиванием и применение обработки в процессе выщелачивания, по сравнению с прямым цианированием, разупрочняет минеральные комплексы и повышает выход тонкого класса, следовательно, вскрывается тонкодисперсное золото и повышается извлечение его в раствор.

В четвертой главе приведены результаты исследований физико-химических основ гидроакустического выщелачивания золота из отходов ЗИФ. Проведенные фазовые и химические исследования по определению вещественного состава в главе 2 выявили основные причины недоизвлечения золота из руд.

Недорастворённое золото можно перевести в раствор за счет увеличения времени выщелачивания, концентрации растворителя и окислителя. Золото, находящееся в сростках с сульфидами, ассоциированное с оксидами и гидроксидами железа, и карбонатами, требует применения нестандартных способов извлечения.

На основании анализа обзора литературных данных за основу был выбран гидроакустический излучатель широкого спектра частот (разработанный в лаборатории интенсификации технологических процессов «МИСиС») применительно к золотосодержащему сырью. На рисунке 5 представлена принципиальная схема гидроакустического излучателя широкого спектра частот нового типа.

Отличительная особенность предложенных излучателей заключается в следующем:

- в нижней и верхней части отфрезерованы две резонаторные камеры, в которые при монтаже устанавливаются вкладыши, выполненные из

высокохромистой стали марки Гадфильда Р.В. 110Г13Л – ГОСТ 977-88, с утолщениями по краям;

- положение вкладыша сделано так, что при давлении поступающей пульпы на вход гидроакустического излучателя 3-4 атм, в резонаторных камерах создается разрежение 0,3-0,5 кг/см². Этой степени разрежения достаточно для засасывания воздуха из атмосферы, который в резонаторных камерах диспергирует, что приводит к повышению концентрации растворенного кислорода воздуха в пульпе.

- при прохождении струи через гидроакустический излучатель на выходе возникают вторичные эффекты (кавитация, пульсация, микро- и макротоки и знакопеременные давления).

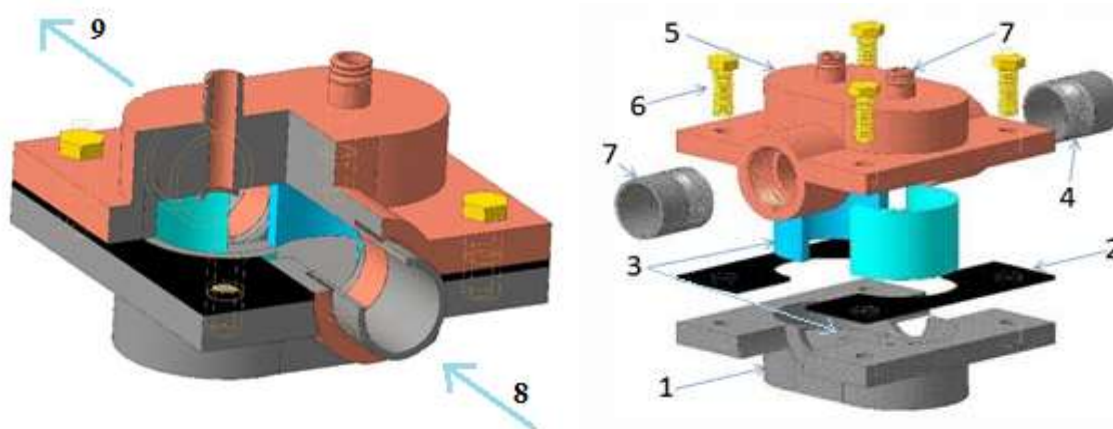
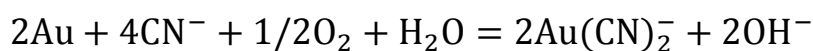


Рисунок 5 - Гидроакустический излучатель широкого спектра частот нового типа. 1-основание; 2-прокладка; 3-вкладыш и резонаторная камера; 4-патрубок; 5-крышка; 6-болт; 7- патрубок для всасывания воздуха и подачи цианидного раствора; 8- входной патрубок 9-выходной патрубок.

Повышение концентрации растворенного кислорода воздуха в пульпе имеет важное значение для интенсификации процесса выщелачивания золота. Реакция растворения золота в цианидных растворах в присутствии кислорода протекает следующим образом:



Следует отметить, что лимитирующей стадией растворения золота по приведенной реакцией в цианидных растворах является недостаток концентрации растворенного кислорода воздуха в пульпе. Таким образом,

повышение концентрации растворенного кислорода приведет к увеличению скорости растворения золота.

На лабораторной установке изучено изменение концентрации кислорода воздуха от давления пульпы (при отношении $ж:t=2:1$) на входе гидроакустического излучателя. Результаты опытов представлены на рисунке 6.

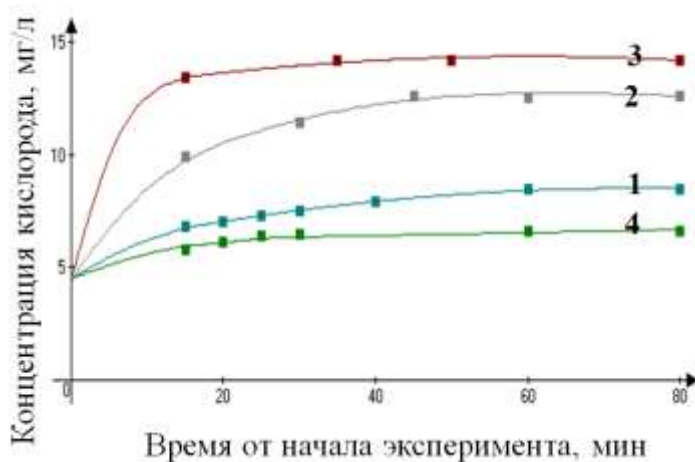


Рисунок 6 – Зависимость изменения концентрации кислорода воздуха в пульпе от времени и давления: 1 – 2 атм; 2 – 3 атм; 3 – 4 атм; 4 – 6 атм.

Как видно из рисунка 6, наибольшее насыщение кислородом воздуха раствора происходит при давлении 4 атм – 14,2 мг/л (кривая 3), а при 3 атм – 12,6 мг/л (кривая 2). При понижении давления до 2 атм насыщение идёт медленнее, и достигает величины 8,6 мг/л (кривая 1). Медленнее идет насыщение раствора кислородом воздуха при дальнейшем повышении давления пульпы (кривая 4). Это связано с тем, что нарушается движение пульпы в резонаторных камерах, что приводит к меньшей степени разряжения и, как следствие, поступает меньшее количество воздуха в пульпу.

Изучено влияние гидроакустического излучателя на изменение гранулометрического состава отвалов при давлении пульпы - 3 атм и времени обработки - 6 ч (рисунок 7). Как видно из рисунка 7, при применении гидроакустического излучателя происходит существенное истирание материала за счет возникновения вторичных эффектов (кавитация, пульсация, микро- и макропотоки и знакопеременные давления).

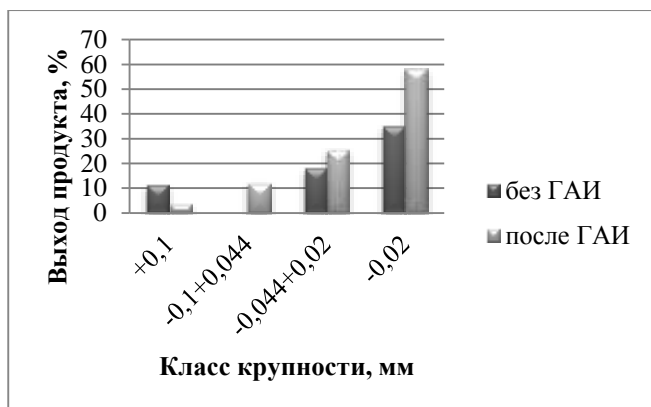


Рисунок 7 - Сравнительные результаты гранулометрического анализа крупности хвостов ЗИФ до и после обработки ГАИ.

Так, количество мелкого класса -0,02 мм увеличилось с 35,4 % до 58,2 %, а класса -0,044+0,02 увеличилось с 18,5 % до 25,9 %. Следует ожидать, что это приведет к более полному раскрытию золотинок и в конечном итоге к увеличению извлечения золота в раствор.

На рисунке 8 приведены сравнительные результаты извлечения золота в зависимости от продолжительности прямого цианирования с применением: акустической обработки в процессе цианирования, магнитно-импульсной обработки в процессе цианирования и цианирования с применением гидроакустической обработки.

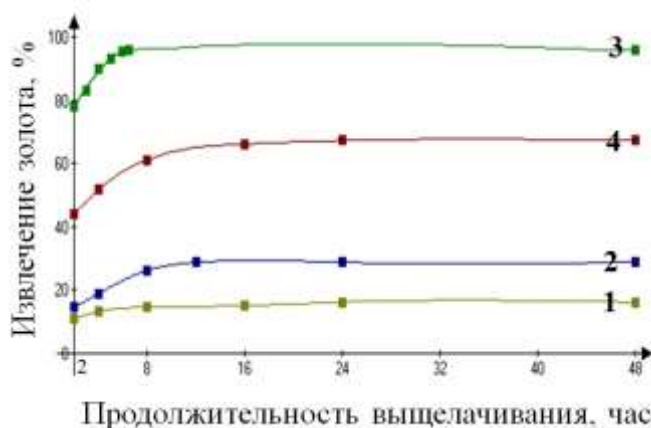


Рисунок 8 – Зависимость извлечения золота от продолжительности цианирования. 1 – прямое цианирование; 2 - акустическая обработка в процессе цианирования; 3 – гидроакустическая обработка в процессе цианирования; 4 – магнитно-импульсная обработка в процессе цианирования.

Как видно из рисунка 8, применение гидроакустической обработки в процессе цианирования позволяет не только существенно повысить извлечение золота из отвалов с 16,2% до 95,5%, но и сократить время выщелачивания до 6 вместо обычных 24 часов.

Изучено влияние концентрации цианида на степень извлечения золота от концентрации кислорода воздуха (рисунок 9).

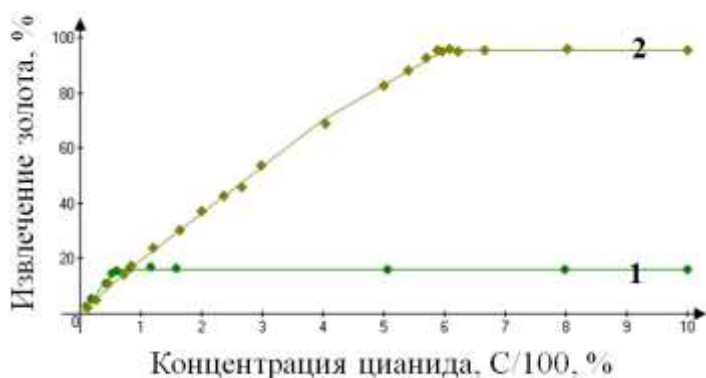


Рисунок 9 – Зависимость извлечения золота от концентрации цианида и кислорода. 1 – при концентрации кислорода 4,5 мг/л; 2 – при концентрации кислорода 12,6 мг/л.

Как видно из полученных данных, степень извлечения золота с повышением концентрации цианида остается на уровне 16,2 % (кривая 1), в то время как максимальное извлечение золота 95,5 % достигается при концентрации кислорода 12,6 мг/л и концентрации цианида 0,06 %.

На основании экспериментальных данных, проведены кинетические расчеты растворения золота с применением гидроакустического излучателя для определения порядка реакции по содержанию растворенного кислорода в пульпе и лимитирующей стадии. Построена логарифмическая зависимость скорости растворения золота от концентрации растворенного кислорода и обратной температуры. Рассчитаны порядок реакции по концентрации растворенного кислорода и энергия активации (рисунок 10).

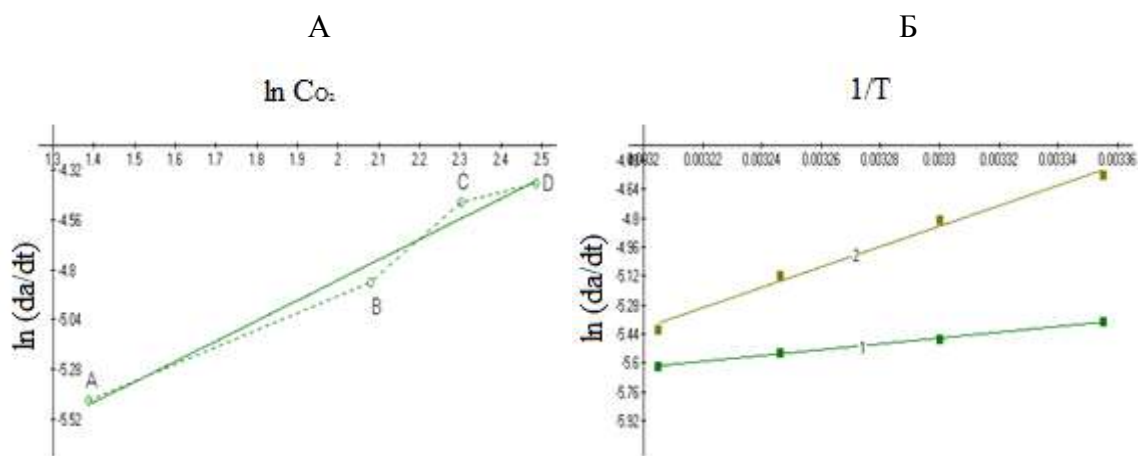


Рисунок 10 - Логарифмическая зависимость $\ln \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}$ от $\ln C_{O_2}$ (А) и $\frac{1}{T}$ (Б).

1- предварительная гидроакустическая обработка с последующим цианированием; 2 – гидроакустическая обработка в процессе цианирования.

На рисунке 10А, исходя из графика зависимости $\ln \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}$ от $\ln C_{O_2}$, был определен порядок реакции по концентрации растворенного кислорода:

$$n = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta \ln \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}}{\Delta \ln C} = \frac{-4.477 + 5.326}{2.376 - 1.518} = 0.98 \quad n < 1$$

Исходя из графика зависимости $\ln \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}$ от $\frac{1}{T}$ (рисунок 10Б) была рассчитана энергия активации (таблица 4).

Таблица 4 – Значения энергии активации

Предварительная гидроакустическая обработка с последующим цианированием	Гидроакустическая обработка в процессе выщелачивания
$E_a = \operatorname{tg} \alpha \cdot R = 13,2 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	$E_a = 46,6 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$

Таким образом, полученное значение порядка реакции меньше 1, а также полученные значения энергии активации с применением гидроакустической обработки в процессе цианирования и с предварительной гидроакустической обработкой с последующим цианированием, свидетельствуют о том, что повышение концентрации растворенного кислорода в пульпе приведет к переходу режима выщелачивания из диффузионного в кинетический.

В пятой главе приведены результаты укрупнённо-промышленных испытаний по применению гидроакустических излучателей для извлечения золота.

Проведены исследования с применением гидроакустической обработки в процессе выщелачивания на предприятии ООО «Пирит-М» на реакторе объёмом 0,7 м³. Реактор снабжен механической мешалкой. После заполнения 50% объёма аппарата пульпой происходит одновременное отключение механической мешалки до конца процесса и засасывание пульпы в насос с последующей подачей ее под давлением в гидроакустический излучатель. Схема установки показана на рисунке 11.

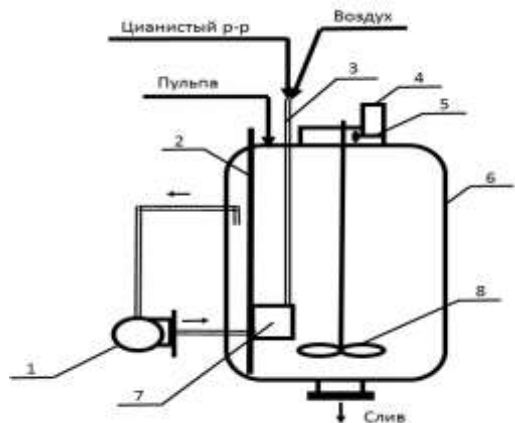


Рисунок 11 – Установка для укрупненно-лабораторных испытаний. 1 – насос; 2 – штанга; 3 – патрубок; 4 – вентиляция; 5 – заслонка; 6 – емкость; 7 – гидроакустический излучатель; 8 – мешалка.

Изучено влияние давления подачи пульпы на вход гидроакустического излучателя на степень дисперсности материала. Эксперименты показали, что при низких давлениях (до 2 атм) у входа излучателя, наблюдалось незначительное увеличение выхода класса крупности -0,02 мм. Заметное увеличение диспергирования наблюдалось при давлении в 3-3,5 атм. В этом случае также происходит мощное движение, приводящее к перемешиванию и исключающее осаждение материала на дно реактора.

На основании проведённых исследований предложена технологическая схема извлечения золота из хвостов ЗИФ (рисунок 12). Следует отметить, что материал, хранящийся в хвостохранилищах, измельчён до крупности -0,074 мм и находится в однородном состоянии. Цианирование осуществляется в реакторах, снабжённых гидроакустическими излучателями, которые помещаются в нижней части реактора. Концентрация цианида в растворе должна быть ~0,06 %, щёлочи – 0,1 %. Раствор подаётся на вход всасывающей трубы гидроакустического излучателя, через которую засасывается воздух. Контроль за концентрацией растворенного кислорода воздуха в пульпе ведут с помощью оксиметра, а pH с помощью pH-метра непрерывно, соотношение ж:т = 2:1. Результаты цианирования хвостов ЗИФ представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты цианирования хвостов ЗИФ с применением гидроакустической обработки (концентрация кислорода 12-12,5 мг/л).

Время выщелачивания, ч.	Концентрация NaCN, %	Концентрация в растворе, мг/л		Содержание в кеке, г/т		Извлечение, %	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
2	0,01	0,11	1,19	0,49	7,11	30,56	25,14
	0,06	0,25	3,15	0,21	3,19	70,14	66,32
	0,10	0,26	3,09	0,19	3,31	73,1	65,14
4	0,01	0,13	1,61	0,45	6,28	37,04	33,89
	0,06	0,31	3,61	0,08	2,26	88,34	76,13
	0,10	0,32	3,79	0,08	1,91	88,52	76,89
6	0,01	0,15	1,90	0,41	5,68	42,5	40,12
	0,06	0,34	4,25	0,04	0,99	94,63	89,57
	0,10	0,34	4,25	0,038	0,98	94,62	89,59
8	0,01	0,20	2,38	0,31	4,73	56,46	50,17
	0,06	0,34	4,25	0,04	0,98	94,63	89,60
	0,10	0,34	4,25	0,04	0,99	94,63	89,63

После 6 часов выщелачивания пульпа направляется на сорбцию с применением активированного угля.

Из полученных данных видно, что увеличение времени выщелачивания с 6 до 8 ч не приводит к повышению измельчения золота и серебра, однако 4 ч недостаточно для полного растворения.

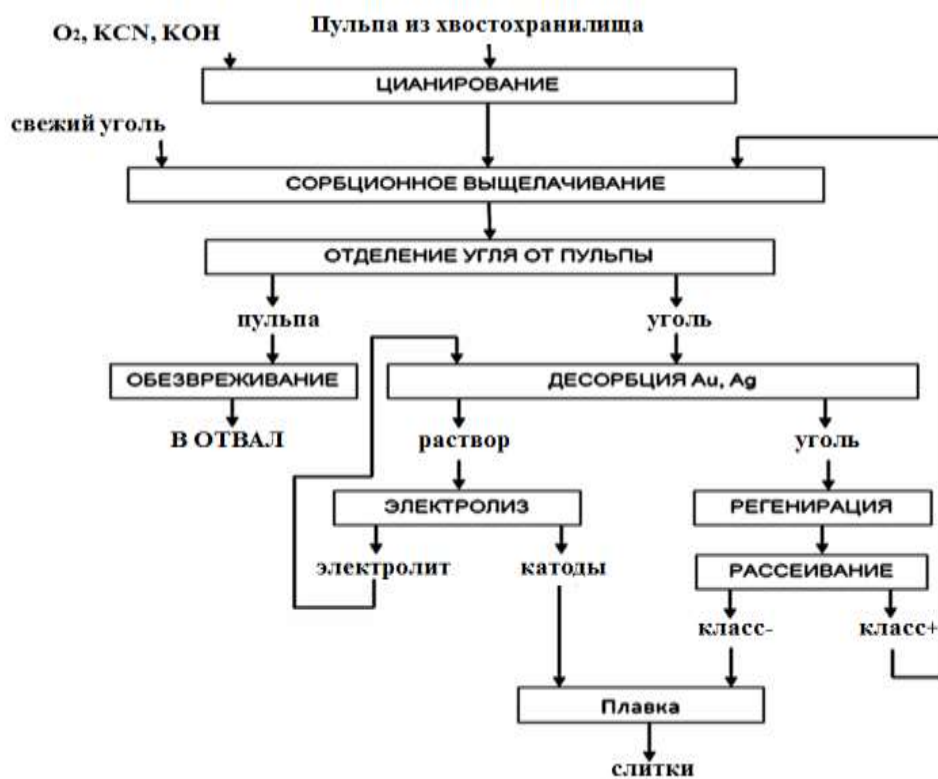


Рисунок 12 – Принципиальная схема переработки хвостов ЗИФ с применением гидроакустической обработки.

Выводы

1. Проведены химические, рентгенофазовые и рентгеноструктурные анализы отвалов ОАО «Покровский рудник». Установлено, что в растворимой форме находится только 16,2% золота, а остальное золото недоступно для растворения: ассоциированное с сульфидными минералами - 45,7%, с оксидами и гидроксидами железа, и карбонатами - 17,6%, и в тонковкрапленном виде в пороодообразующих минералах - 14,7%.

2. Выполнены исследования по предварительной обработке отходов золотоизвлекательной фабрики в ультразвуком поле с частотой $20 \pm 1,65$ кГц, с числом ультразвуковых излучателей -12 штук, напряжением питания 380/50 В/Гц, потребляемой мощностью не более 1,0 кВт. Извлечение золота в результате обработки повысилось с 16,2% до 28,8%. Установлено, что

применение магнитострикционных преобразователей незначительно повышает долю цианируемого золота.

3. Изучено влияние магнитно-импульсной обработки хвостов на извлечение из них золота. Исследовано воздействие количества импульсов электромагнитного поля и времени обработки на степень извлечения золота. Установлено, что при оптимальных условиях обработки извлечение золота не превышает 67,2%. Это связано с тем, что оставшая часть золота в хвостах связано с немагнитовосприимчивыми сульфидными минералами.

4. Установлено, что при использовании гидроакустического воздействия в процессе выщелачивания происходит измельчение материала с увеличением класса крупности -0,02мм с 35,4% до 58,2%, повышается концентрация кислорода с 4-6 мг/л до 14,5 мг/л, увеличивается степень извлечения золота за счет разрушения минеральных зерен, содержащих ассоциированное и тонковкрапленное золото, до 95.5%.

5. Определены технологические параметры и разработана технология переработки отвалов золотоизвлекательных фабрик с применением цианидного выщелачивания, обеспечивающая извлечение золота до 95,6% и увеличение производительности фабрики в 4-6 раз за счет сокращения времени цианирования до 4-6 часов вместо обычных 24-48 часов.

6. Проведены опытно-промышленные испытания по применению гидроакустических излучателей в процессе цианирования золотосодержащих отвалов ОАО «Покровский рудник. Показано, что предложенная технология позволит эффективно перерабатывать отвалы ЗИФ с высокой степенью извлечения золота и серебра. При этом экономический эффект переработки одной тонны отвалов составит 315 руб.

Основное содержание работы отражено в публикациях

1. Меретуков М.А., Гурин К.К. Поведение золота в хвостовых отвалах. «Цветные металлы» № 7, 2011, с. 27-31.

2. Гурин К.К., Башлыкова Т.В., Ананьев П.П., Бобоев И.Р., Горбунов Е.П. Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики от переработки упорных руд смешанного типа. «Цветные металлы» № 5, 2013, с. 41-45.

3. Стрижко Л.С., Бобоев И.Р., Гурин К.К., Рабиев Ф.Б. Разработка гидрометаллургической технологии переработки окисленных золотосодержащих руд Таррорского месторождения. «Цветные металлы» № 4, 2013, с.46-49.

4. Лолейт С.И., Меретуков М.А., Стрижко Л.С., Гурин К.К. Современные проблемы металлургии и материаловедения благородных металлов: учебное пособие. -М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 196 с.

5. Boboev I.R., Strijko L.S., Gurin K.K., Shereni A. The physico-chemical basis of gold recovery from calcines, containing iron and copper. Materials of the international research and practice conference «Science, Technology and Higher Education», vol.II, p. 377-381. Westwood, Canada, 11-12 December 2012.

6. Boboev I.R., Strijko L.S., Gurin K.K., Shereni A. Influence of impurities on the rate of gold dissolution. Materials of the international research and practice conference «Science and Education», vol.1, p. 101-105 Munich, Germany, 18-19 December 2012.

7. Ноу-хау № 13-341-2013 ОИС от «17» апреля 2013 г. Стрижко Л.С., Гурин К.К., Бобоев И.Р./ «Применение гидроакустических излучателей в процессе цианирования». Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау Отдела защиты интеллектуальной собственности МИСиС.

8. Стрижко Л.С., Шигин Е.С., Фокин О.А., Гурин К.К. Разработка программы определения расходных коэффициентов технологических схем переработки электронного лома, Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011», Одесса 2012.