

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт Геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра Химической и биохимической инженерии

Алиев Астан Исмаилович

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Применение технологии бактериальное-химического выщелачивания для
сульфидных золотосодержащих руд»

6B05101– «Химическая и биохимическая инженерия»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт Геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова
Кафедра Химической и биохимической инженерии



ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Применение технологии бактериально-химического
выщелачивания для сульфидных золотосодержащих руд»

6B05101 – Химическая и биохимическая инженерия

Выполнил

Алиев А. И.

Рецензент



Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт геологии и нефтегазового дела
Кафедра химической и биохимической инженерии

6B05101 – Химическая и биохимическая инженерия

УТВЕРЖДАЮ



Заведующий кафедрой
Химическая и биохимическая
инженерия
Доктор PhD

А. А. Амитова

13.11.2024г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Алиевым Астанам Исмаиловичам

Тема: «Применение технологии бактериальное-химического выщелачивания для
сульфидных золотосодержащих руд»

Утверждена приказом Ректора Университета № 548 от 4 декабря 2023 г.

Срок сдачи законченной работы « » 2024 г.

Исходные данные к дипломной работе:

Краткое содержание работы:

- а) Литературный обзор
- б) Суздальское месторождение
- в) Экспериментальная часть
- г) Экономическая часть
- д) Техника безопасности и экология
- ж) заключение

Перечень графического материала: представлены

Рекомендуемая основная литература: из 12 наименований

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Литературный обзор	15.04.24г	
Экспериментальная часть	25.05.24г	
Экономическая часть	20.04.24г	
Экологическая часть	20.04.24г	

Подписи
консультантов и нормоконтролера на заочную дипломную работу
(проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Экономическая часть	Резман Е. К., кандидат наук, профессор	13.06.24г	
Техника безопасности и экология	Резман Е. К., кандидат наук, профессор	13.06.24г	
Нормоконтролер	Резман Е. К., кандидат наук, профессор	13.06.24г	
Литературный обзор	Резман Е. К., кандидат наук, профессор	13.06.24г	

Научный руководитель

Задание принял к исполнению

Дата



подпись

Ф.И.О.
Иванов А.И.

_____ г

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе рассматривается применение современных технологий бактериально-химического выщелачивания сульфидных золотосодержащих руд. Исследования проводились с учетом текущих тенденций в БХВ-технологиях и инновационных методах. Особое внимание уделено Суздальскому месторождению, где были проанализированы используемые технологии и их преимущества в экономическом и экологическом аспектах. В работе подробно изучены технологии, применяемые на Суздальском месторождении, и на основе проведенного анализа выявлены значительные экономические преимущества бактериально-химического выщелачивания, а также его высокая экологичность. Результаты исследования демонстрируют перспективность использования БХВ-технологий для эффективного и экологически безопасного извлечения золота из сульфидных руд.

ABSTRACT

In this thesis the application of modern technologies of bacterial-chemical leaching sulfide gold-containing ores is considered. The research was based on current trends in SMC technologies and innovative methods. Special attention is paid to Suzdal field, where the used technologies and their advantages in economic and environmental aspects were analyzed. The article studies in detail the technologies used in the Suzdal field, and based on the analysis revealed significant economic advantages of bacterial-chemical leaching, as well as its high environmental friendliness. The results of the study demonstrate the potential for using BHC technologies to extract gold from sulphide ores in an efficient and environmentally sound manner.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста құрамында алтын бар сульфидті кендерді бактериялық-химиялық шаймалаудың заманауи технологияларын қолдану қарастырылады. Зерттеулер БХВ технологиялары мен инновациялық әдістердің қазіргі тенденцияларын ескере отырып жүргізілді. Суздаль кен орнына ерекше назар аударылды, онда қолданылатын технологиялар мен олардың экономикалық және экологиялық аспектілердегі артықшылықтары талданды. Жұмыста Суздаль кен орнында қолданылатын технологиялар егжей-тегжейлі зерттеліп, жүргізілген талдау негізінде бактериялық-химиялық шаймалаудың елеулі экономикалық артықшылықтары, сондай-ақ оның жоғары экологиялық тазалығы анықталды. Зерттеу нәтижелері сульфидті кендерден Алтынды тиімді және экологиялық таза алу үшін БНВ технологияларын қолдану перспективасын көрсетеді.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	1
Актуальность работы	1
1. Литературный обзор	3
1.1 Новизна научной работы	3
1.3 Роль микроорганизмов	3
1.3.1 Роль Acidithiobacillus ferrooxidans и Acidithiobacillus	3
1.3.2 Роль Sulfolobus	4
1.3.3 Роль Leptospirillum	4
1.4 Культивирование A. ferrooxidans, A. thiooxidans, Sulfolobus, Leptospirillum	5
1.4.1 Активирование, адаптация и оптимизация бактерий при биовыщелачивании	5
1.4.2 Состав среды	7
1.5. Суздальское месторождение	9
1.6 Механизм бактериального окисления сульфидных минералов	11
2. Экспериментальная часть	14
2.2.1 Сравнительный анализ	15
2.2.2 параметры при использовании технологии Outotec BIOX®	17
2.2.3 Бактерии используемые в BIOX®	18
2.3 ASTER™ на руднике «Суздаль»	18
2.5 Технология MesoTherm BIOX®	22
3. Экономическая часть	25
4. Техника безопасности и экология	27
4.1 Техника безопасности и экология на примере установок HiTeCC, ASTER™ и Outotec BIOX® на Суздальском месторождении	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	30
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	31

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Бактериально-химическое выщелачивание имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами. Прежде всего, оно экологически чистое, поскольку не используются токсичные вещества, а используются бактерии, которые не вредят окружающей среде, такие как *Acidithiobacillus ferrooxidans* и т.д. Установлено, что он имеет более низкие капитальные и эксплуатационные затраты благодаря более простым процессам и низкой энергоемкости. Эффективность извлечения золота из бедных комплексных руд позволит увеличить выход металла и, следовательно, рентабельность; использование экологически чистых технологий помогает компаниям избежать штрафных мер и затрат, связанных с экологическими правонарушениями, и восстановлением окружающей среды, а также улучшает имидж компаний, лояльность общественности и государственных органов.

Его эффективность заключается в способности бактерий разлагать сульфиды и высвобождать золото для дальнейшего извлечения; это очень важно для низкосортных руд со сложными минералогическими составами. Механизм выщелачивания БХВ заключается в бактериальном окислении сульфидных минералов, при котором бактерии используют выделяющуюся в результате окисления химическую энергию для метаболизма. Процесс состоит из трех ключевых стадий: инокуляция, окисление и выщелачивание. На первом этапе, называемом стадией инокуляции, бактериальные агрегаты вступают в контакт с измельченными минералами. В случае, когда присутствует пирит (FeS_2), который является одним из сульфидных минералов, бактерии окисляют сульфидные минералы и, следовательно, высвобождают связанное золото. Соединения золота, содержащиеся в растворе при выщелачивании, могут быть извлечены в растворимых формах с помощью сорбции, цементирования и других методов. Сегодня научные исследования предоставляют возможности для повышения эффективности БХВ за счет генного модифицирования микроорганизмов, оптимизации процесса и комбинирования с другими методами обработки. Модернизация культуры, в частности биопленки, и изменения в культуре способны значительно повысить скорость и эффективность выщелачивания.

Цели и задачи

Целью данной работы является изучение применения технологии бактериальное-химического выщелачивания для сульфидных золотосодержащих руд. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

-Провести обзор литературы по применению технологии бактериальное-химического выщелачивания для сульфидных руд и провести сравнительный анализ с традиционными методами.

-Изучить механизм бактериального окисления сульфидных золотосодержащих минералов.

-Описать механизмы прямого и косвенного бактериального окисления.

-Исследовать оптимальные условия, при которых мезофильные хемолитотрофные организмы наиболее активны и могут эффективно использоваться в процессе БХВ.

-Изучить и описать технологию бактериальное-химического выщелачивания, применяемую на Суздальском месторождении, а также оценить её экономическую и экологическую эффективность.

Главной задачей является детальное изучение технологии бактериальное-химического выщелачивания и связанных с ней процессов на Суздальском месторождении, а также описание применимых там технологий

1. Литературный обзор

1.1 Новизна научной работы

Технология биовыщелачивания сульфидных руд основанная на способности хемолитотрофных мезофильных микроорганизмов окислять сульфидные минералы и высвобождать золото, ныне известная как BIOX начала свой путь в ЮАР, и именно тогда она показала, насколько выгоден данный способ выщелачивания в золотодобывающей промышленности, особенно в крупных производствах. Успех продемонстрированной в ЮАР компаний Gencor, наглядно показал, насколько более простым, экологическим и экономическим выгодным является биовыщелачивания в сравнение с другими традиционными методами выщелачивания сульфидных минералов как арсенопирит, пирит, пирротин. В данный момент насчитывается несколько инновационных биотехнологических технология выщелачивания таких как MesoTherm BIOX® и VacTech. В первом случаи у нас идёт комбинированная технология мезофильных и термофильных микроорганизмов, а во втором уже умеренно термофильных микроорганизмов.

1.3 Роль микроорганизмов

1.3.1 Роль *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus*

Acidithiobacillus ferrooxidans и *Acidithiobacillus thiooxidans* – это бактерии рода *Acidithiobacillus*, представляющие собой мезофильные хемолитотрофные микроорганизмы. Эти бактерии широко используются в биогеохимии благодаря своей способности окислять сульфидные минералы и железо (Fe^{2+}) до окисного железа (Fe^{3+}). *Acidithiobacillus ferrooxidans*, так называемые железобактерии, окисляют железо и сульфиды, в то время как *Acidithiobacillus thiooxidans*, известные как серобактерии, окисляют серу и сульфиды до серной кислоты.

Acidithiobacillus ferrooxidans окисляет закисное железо (Fe^{2+}) до окисного железа (Fe^{3+}), что способствует реакциям с сульфидными минералами, такими как пирит (FeS_2), и приводит к образованию серной кислоты, что ускоряет процесс растворения металлов. С другой стороны, *Acidithiobacillus thiooxidans* окисляет серу и тиосульфаты до сульфатов, дополнительно поддерживая низкий уровень pH, необходимый для эффективного выщелачивания металлов.

Эти два микроорганизма часто функционируют совместно, создавая оптимальные условия для выщелачивания сульфидных соединений и более эффективного извлечения металлов. В процессе своего метаболизма *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans* поддерживают

низкий уровень pH, что является критически важным для процесса биовыщелачивания. Этот симбиотический метаболизм делает их одними из наиболее изученных и часто используемых ацидофильных микроорганизмов в промышленности.

1.3.2 Роль *Sulfolobus*

В промышленных системах биовыщелачивания обычно используются аэробные микроорганизмы, особенно автотрофные бактерии, связанные с атакуемым минералом, такие как *Acidithiobacillus* и *Leptospirillum*, которые способны эффективно работать при более умеренных условиях температуры и кислотности, что делает их более подходящими для промышленной эксплуатации. Причина заключается в том, что для использования термофильных микроорганизмов как *Sulfolobus* в промышленных процессах, таких как биовыщелачивание, требуются специфические условия культуры, включая высокие температуры (обычно более 70-80°C) и кислотность. Такие условия могут быть сложны для поддержания на промышленном масштабе, и, кроме того, могут потребовать значительных энергетических и инженерных затрат для обеспечения оптимальных условий роста и активности *Sulfolobus*. Однако в ходе изучения кинетики окисления выявили, что при повышении температуры на 10 процентов скорость выщелачивания увеличивается в 2 раза, а сокращение времени выщелачивания представляет экономический интерес. Однако из-за чувствительности мембран к агрессивным технологическим условиям их использования может быть ограничено. Зачастую целесообразно бактериальное выщелачивание не золота, а примесей (например, предварительное выщелачивание мышьяка и железа из карбонатных сульфидных минералов, содержащих окклюдированное золото).

Тем не менее, *Sulfolobus* и другие архейные организмы остаются предметом научного исследования, и их потенциальное использование в промышленных процессах может быть изучено в будущем, особенно в контексте развития новых технологий и методов биотехнологии. В настоящее время уже разработаны технологии биовыщелачивания, которые используют термофильные бактерии.

1.3.3 Роль *Leptospirillum*

Leptospirillum - хемолитотрофные бактерии, окисляющие железо. Наиболее изученными видами являются *Leptospirillum ferrooxidans* и *Leptospirillum ferriphilum*. Бактерии используются для биовыщелачивания пирита (FeS_2) и арсенопирита (FeAsS) в умеренных термофильных условиях. Кроме того, бактерии участвуют в восстановлении окислителя в виде ионов Fe^{3+} , что имеет первостепенное значение с точки зрения поддержания непрерывного процесса окисления на стадии выщелачивания. Поскольку бактерии обладают высокой устойчивостью к кислым средам, температурам (42-50°C), тяжелым металлам, они могут наиболее эффективно действовать в

более суровых условиях по сравнению с *Acidobacillus ferrooxidans*. Среди наиболее изученных - *Leptospirillum ferrooxidans* и *Leptospirillum ferriphilum*, которые представляют собой два вида аэробных железобактерий, обитающих в кислой руде и рудных отвалах. Они являются ключевыми участниками биогеохимических циклов, прежде всего процессов окисления железа и других металлов, и оказывают влияние на процессы добычи полезных ископаемых, экологическую устойчивость и биологическую очистку. Хотя морфологические и физиологические особенности в целом очень схожи, эти два вида бактерий в некоторой степени отличаются друг от друга, например, окислять различные металлы и *Leptospirillum ferriphilum* является более термофильным. *Leptospirillum ferrooxidans* традиционно считается более универсальным окислителем металлов, поскольку известно, что он окисляет не только железо, но и серебро и, в целом, считается полезным для его потенциального использования в биологических процессах обогащения руды. Кроме того, являясь по существу окислителем железа, *L. ferriphilum* может быть эффективнее при определенных условиях и/или на некоторых металлах. Это, в свою очередь, требует понимания различий между этими двумя видами, чтобы понять роль этих бактерий в геохимических процессах и разработать методы использования их потенциала в различных областях науки и промышленности.

1.4 Культивирование *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Sulfolobus*, *Leptospirillum*

1.4.1 Активирование, адаптация и оптимизация бактерий при биовыщелачивании.

Acidithiobacillus ferrooxidans, *A. thiooxidans* и активирующие бактерии *Leptospirillum* требуют создания оптимальных условий, отвечающих их физиологическим потребностям. Это предполагает создание кислой среды с низким уровнем pH (обычно в диапазоне от 1,5 до 2,5), что достигается главным образом добавлением кислот, таких как серная кислота. В дополнение к этому, необходимо добавить источник железа, такой как соли железа или минералы, поскольку они используют энергию железа.

Аэробные бактерии должны иметь доступ к кислороду для поддержания своей жизнедеятельности, что достигается хорошей вентиляцией или аэрацией окружающей среды. Также важен контроль температуры, pH и других параметров окружающей среды для обеспечения наиболее комфортных условий для роста и размножения бактерий. После приготовления среды и внесения активированных форм бактерий их обычно инкубируют при определенных условиях, что дает им возможность создать популяцию.

Условия активации могут варьироваться в зависимости от конкретных целей использования и характера процесса, в котором они будут задействованы. Процесс адаптации бактерий к условиям выщелачивания включает несколько важных этапов. Во-первых, отбор штаммов бактерий с

высокой устойчивостью к воздействию тяжелых металлов и экстремальными значениями рН. Во-вторых, постепенная адаптация к условиям окружающей среды путем увеличения концентрации токсичных веществ, что облегчает адаптацию бактерий к неблагоприятным условиям. Наконец, генетическая модификация является важным методом создания штаммов с улучшенными метаболическими характеристиками, который может быть реализован с помощью методов геной инженерии.

Для успешного культивирования бактерий рода *Sulfolobus* необходимо создать условия, соответствующие их термофильным характеристикам. Это включает создание кислой среды с низким рН, обычно 2-3, путем добавления кислот, таких как серная кислота, поддержание высоких температур выше 70°C, создание среды с соединениями серы в качестве источника энергии для бактерий, а также контроль рН, температуры и других параметров окружающей среды.

Такие условия обеспечивают физико-химические факторы для жизнедеятельности и роста *Sulfolobus* в экстремальных гидротермальных условиях, что очень важно для их биологии, экологии и возможного применения во многих биотехнологических процессах.

Таблица 1.1 - Оптимальные параметры

Параметры	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	<i>Sulfolobus</i>
Оптимальная температура	28-35°C	28-35°C	45-50°C	70-80°C
Минимальная температура	5°C	10°C	10°C	55-60°C
Максимальная температура	45°C	45°C	50°C	90°C
Оптимальный рН	2.0	2.0	1.8	2.0-3.5
Минимальный рН	0.3	0.3	1.0	1.0
Максимальный рН	4.0	4.0	3.5	5.0

Как видно из таблицы *Leptospirillum* является более термофильным чем *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*, а *Sulfolobus* как архей может выживать в экстремальных условиях. На самом деле в зависимости от штаммов могут различаться параметры

1.4.2 Состав среды

Среда Сильвермана и Люндгрена

Среда 9К представляет собой специализированный питательный раствор, используемый для культивирования микроорганизмов, таких как *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*, которые играют ключевую роль в процессах биовыщелачивания сульфидных руд. Основная цель применения среды 9К – обеспечить оптимальные условия для роста и метаболической активности этих бактерий, способствуя эффективному выщелачиванию металлов из рудного материала.

Среда 9К включает в себя набор макро- и микроэлементов, необходимых для жизнедеятельности хемолитотрофных бактерий. Стандартный состав среды 9К включает следующие компоненты (в граммах на литр воды):

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (Сульфат аммония): 3,0 г/л

Аммоний служит источником азота, необходимого для синтеза аминокислот и белков, что способствует росту и размножению бактерий.

K_2HPO_4 (Фосфат калия): 0,5 г/л

Фосфат калия используется как источник фосфора, который необходим для синтеза нуклеиновых кислот и других ключевых молекул.

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Сульфат магния): 0,5 г/л

Магний важен для активности многих ферментов и стабилизации рибосом, что необходимо для эффективного протекания метаболических процессов.

KCl (Хлорид калия): 0,1 г/л

Калий играет важную роль в поддержании осмотического баланса и активации ферментов, участвующих в метаболизме.

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (Нитрат кальция): 0,01 г/л

Кальций необходим для стабилизации клеточных стенок и сигнальных путей внутри клеток.

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Сульфат железа): 44,2 мг/л

Железо служит основным субстратом для окислительно-восстановительных реакций, проводимых *A. ferrooxidans*, что является критически важным для процесса биовыщелачивания.

Значение компонентов среды 9К

Каждый из компонентов среды 9К играет определенную роль в обеспечении оптимальных условий для роста и активности *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*. Высокая концентрация аммония

обеспечивает необходимое количество азота для синтеза белков и нуклеиновых кислот, что способствует интенсивному размножению бактерий. Фосфат калия поставляет фосфор, который участвует в энергетическом обмене и синтезе ДНК, РНК и АТФ.

Сульфат магния и хлорид калия способствуют поддержанию осмотического баланса и ионного состава внутри клеток, что важно для нормального функционирования ферментов и других белков. Нитрат кальция добавляется в малых количествах для стабилизации клеточных структур и улучшения межклеточных взаимодействий.

Сульфат железа, присутствующий в среде, играет ключевую роль в метаболизме *Acidithiobacillus ferrooxidans*, поскольку железо служит основным акцептором электронов в процессе окисления железа. Этот процесс высвобождает энергию, необходимую для роста и метаболической активности бактерий, что, в свою очередь, ускоряет процесс выщелачивания металлов из рудных материалов.



Рисунок 1 – раствор 9К с бактериями *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Питательная среда для *Sulfolobus*

Для жизнедеятельности бактерии *Sulfolobus* необходима питательная среда, содержащая (г/л): K_2HPO_4 - 0,05; $MgSO_4$ - 0,12; KCl - 0,002 и соль Мора - 15. Раствор доводится серной кислотой до pH 2,2–2,4 и подается в бактериальную культуру при соотношении 1:1. После окисления раствора бактериями Fe^{2+} , половина его направляется на выщелачивание, а в другую — добавляют питательный раствор.

Среда Норриса и Келли для *Leptosporilium ferrooxidans*

Среда Норриса и Келли для *Leptosporilium ferrooxidans* – это модифицированная среда 9К, в которую также входят соли сульфата аммония, магния и гидроортофосфата натрия, но в меньших концентрациях, чем в стандартной среде 9К:

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0,2 г/л

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,4 г/л

K_2HPO_4 – 0,1 г/л

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – ммоль/л

1.5. Суздальское месторождение

Характеристика месторождение и упорной золотосодержащий руды

Суздальское месторождение золота расположено в степном районе северо-восточного Казахстана, всего в 50 км от Семей. Это одно из месторождений Западно-Карбинского золотого пояса. В глобальном масштабе оно не велико, но характеризуется относительным изобилием. Месторождение было открыто в 1983 году и стало выдающимся достижением советских геологов. Золотоносная руда была скрыта под слоем песка, и только высокая квалификация специалистов помогла ее обнаружить.

Суздальское месторождение содержит два разных типа рудных зон:

- Оксидная руда залегает на глубине 55 метров под поверхностью.

- Сульфидная руда залегает ниже этой глубины.

Рудное тело представляет собой круто наклоненную линзу длиной несколько сотен метров и толщиной до 20 метров. Содержание золота в руде различно: в оксидной руде оно составляет около 8 граммов на тонну, а в сульфидной - около 6 граммов на тонну. Для извлечения золота из этих двух типов руд используются различные методы переработки. В оксидных рудах золото является "свободным" и может быть извлечено напрямую. В сульфидных рудах золото скрыто в минерале, и для его извлечения необходимо разрушить минерал. Это довольно дорогой и сложный процесс, и лишь немногим компаниям удастся получать прибыль от добычи драгоценных металлов. Суздальское месторождение разрабатывается уже давно, и в период с 1985 по 1994 год было добыто около 5,2 тонны золота. Оксидная руда поставлялась в разные страны, в том числе в Узбекистан и Армению. Добыча продолжается до сих пор, и месторождение продолжает привлекать внимание экспертов и инвесторов.

Состав руды физические и химические показатели

На месторождении выделяются следующие типы золотоносных минерализованных вмещающих пород:

- Углеродистые алевропелиты и песчаники с пиритовой стратифицированной и тонковкрапленной пиритарсенопиритовой минерализацией.
- Брекчированные карбонатные породы с гнездово-прожилковой пиритарсено-пиритовой минерализацией.
- Прокварцованные и брекчированные карбонатно-терригенные породы с гнездово-прожилково-штокверковой золото-полисульфидной минерализацией.
- Минерализованные метабазалты, метадолериты и кварцевые порфиры с крапленной и прожилковой сульфидной минерализацией.

Естественно, самыми главными рудами на этом месторождении являются золото, пирит, пирротин и арсенопирит, то есть сульфидные минералы.

Таблица 2.1 - минерализация в суздальском месторождении

Главные		Второстепенные		Редкие	
Рудные	Жильные	Рудные	Рудные	Жильные	Рудные
Золото	кварц	Антимонит	Эпидиот	киноварь	Гранат
Арсенопирит	Серецит	Рутил	Хлорит	Сурьма самородная	тремолит
Пирит	Кальцит	Анатаз	Сидерит	Cr-шпинель	Монацит
Пирротин	Доломит	Fe-сфалерит	Каолинит	Шеелит	барит
		Халькопирит			
		Барьерит			

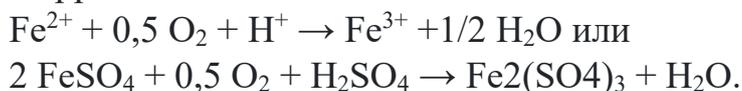
1.6 Механизм бактериального окисления сульфидных минералов

Бактериальное окисление и выщелачивание сульфидных минералов представляет собой сложный процесс, при котором специализированные микроорганизмы, такие как *Thiobacillus ferrooxidans* или *Acidithiobacillus ferrooxidans*, катализируют окисление сульфидов, таких как пирит (FeS_2) или арсенопирит (FeAsS), с использованием кислорода или других акцепторов электронов. В результате этого процесса образуются сульфаты металлов и высвобождаются ионы металлов в окружающую среду. Ранее считалось, что окисление и выщелачивание происходят исключительно химическими агентами, такими как окисное железо и элементарная сера, а бактерии играют роль только как окислители закисного железа и серной кислоты. Однако исследования показали, что микроорганизмы способны окислять сульфидные минералы даже при подавлении их железooksисляющих систем. Современные исследования установили, что "прямой" метод является определяющим при биовыщелачивании. Бактерии, прикрепленные к поверхности минеральных частиц, проникают в их кристаллическую структуру с помощью полисахаридов, липополисахаридов и белков на своей поверхности, а также выделяемых кислот. Затем они катализируют реакцию окисления сульфида, выделяя электроны и протоны. Полученная энергия используется для обеспечения метаболических потребностей бактерий. Итогом этого процесса является образование сульфатов металлов, растворимых в окружающей воде, что облегчает их дальнейшее извлечение.

Теоретически процесс окисления и выщелачивания сульфидных минералов бактериями можно подразделить на два цикла:

В первом цикле происходит непосредственное окисление кристаллической решетки минерала окисным железом и кислородом, а также ферментами, выделяемыми микроорганизмами, такими как ферроксидоза и тиосульфат редуктаза. Этот процесс разрушает кристаллическую решетку сульфидного минерала.

Ферроксидоза:



Окисляя серу и железо тем самым разрушая поверхность минерала, которая не давала нам выщелачивать золото, так как в пирите и арсенопирите золото тесно связано с кристаллами сульфидов. В данной реакции связующий звено между ферментом и субстратом выступает Fe^{2+} из-за того, что он влезает в состав активного центра ферментами при этом имея возможность находится в соединении с обоими при этом удерживать субстрат рядом с активным центром фермента. Последующий распад этого комплекса дает конечный продукт окисления - трехвалентное железо.

Элементарная сера под действием тиосульфат редуктазы:

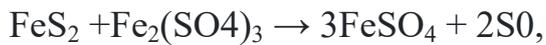


На примере окисление пирита:

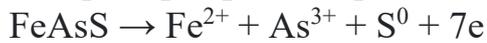
Образование закисного железа



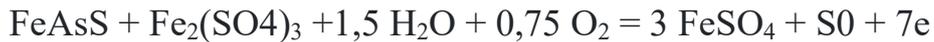
Образование элементарной серы



На примере арсенопирита:



при электрохимическом процессе на поверхности арсенопирита образуется закисное железо, элементарная сера и мышьяковистая кислота:



В присутствии окисного железа образуется арсенат

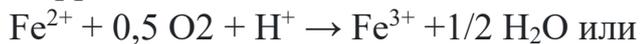


Конечная реакция:



Во втором цикле происходит биоокисление закисного железа и элементарной серы.

Ферроксидаза:



Тиосульфат редуктаза:



Микробное выщелачивание и биогетехнология металлов. Химизм процесса микробного взаимодействия с минералами и горными породами

Модель бактериально-химического окисления арсенопирита *Thiobacillus ferrooxidans* (Г. И. Каравайко, 1984)

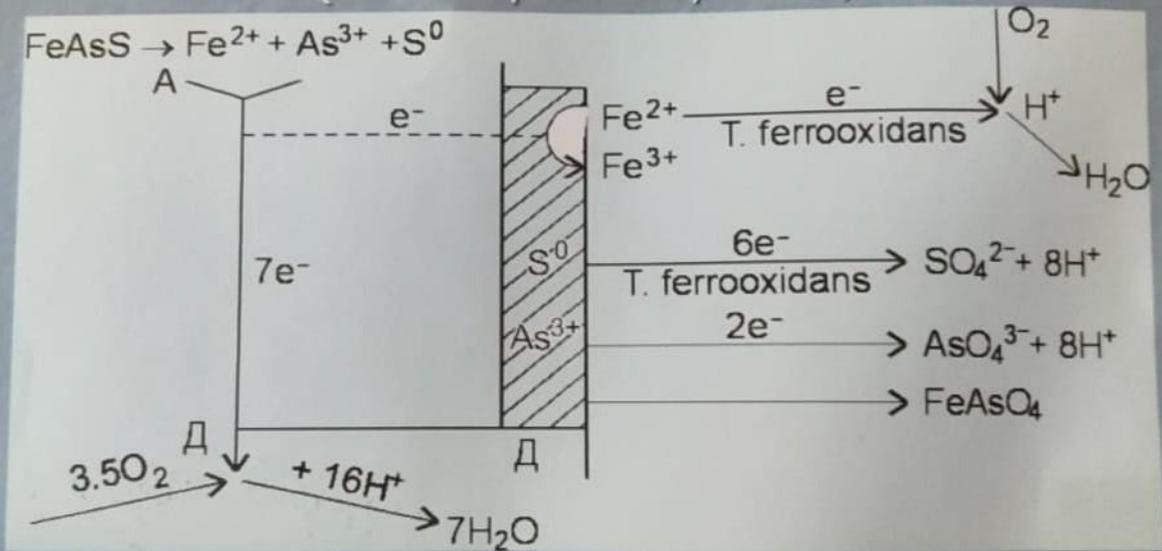


Рисунок 2 - схема биовыщелачивания арсенопирита



Рисунок 3 – раствор с золотом после биовыщелачивания

2. Экспериментальная часть

2.1 Технологическая схема переработки сульфидных руд золотосодержащих руд

В настоящее время Коммерческая компания Outotec владеет правами на технологию биоисследований золотосодержащих сульфидных концентратов ВЮХ. С 1999 по 2005 на руднике «Суздаль» применялась технология кучного выщелачивания для переработки окисленных руд. С 2005 года на руднике применяется экологичная технология Outotec ВЮХ для переработки сульфидных руд.

Подземная добыча на руднике Суздаль ведется из трех рудных зон через четыре наклонно-транспортных съезда. Дополнительные два ствола предназначены только для аварийного доступа. Проходка осуществляется с помощью современных электрогидравлических одностреловых и двухстреловых самоходных буровых установок для бурения скважин, погрузочно-доставочных машин для выемки горной массы и самосвалов с шарнирно-сочлененной рамой для вывоза руды на поверхность. Стабильность выработок поддерживается за счет крепления кровли (фрикционные анкеры, сетки, торкретирование), кроме того, оставляются поддерживающие колонны из не извлекаемой руды (подлежащей или не подлежащей извлечению в будущем), а также проводится засыпка отработанного пространства пустой породой по необходимости. Вентиляция шахты осуществляется через вертикальные стволы, соединяющие отработку с поверхностью, и наклонно-транспортные съезды. Для осушения дашахты используется насосная станция с тремя центробежными насосами: один в эксплуатации, один в резерве и один в обслуживании.

Дробильно-сортировочный комплекс рудника Суздаль обеспечивает переработку приблизительно 550 тыс. тонн руды в год. Переработка осуществляется в три стадии: сначала в щековой дробилке, а затем в конусных дробилках второй и третьей очереди. Щековая дробилка работает в открытом цикле. Перед конусными дробилками установлены головные грохоты; эти дробилки также работают в открытом цикле.



Рисунок 4 - истиратель вибрационный ИВ-1.

В 2020 году Nordgold автоматизировал дробильно-сортировочный комплекс для повышения эффективности управления процессами дробления, измельчения и сортировки руды несмотря на повышение ее твердости. На линии измельчения установлены три шаровые мельницы по 380 кВт.

Флотационная установка состоит из двух камер основной флотации, одной раскислительной и двух перечистных камер.

На таких месторождениях, как Суздаль, применяемая компанией Outotec технология бактериально-химического окисления BIOX® имеет решающее значение для предварительной обработки тугоплавких руд перед последующим цианидным выщелачиванием. Это имеет решающее значение из-за сложной химической природы добываемых руд, благодаря которым золото содержится в сульфидных минералах, таких как пирит и арсенопирит. Из-за неэффективности цианидов при выщелачивании золота из таких руд необходимо применять альтернативные методы выщелачивания золота, которые могут разрушать сульфиды и приводить к высвобождению золота, пригодного для извлечения. Предполагается, что после биологического окисления и цианидного выщелачивания раствор, содержащий золото, подвергнется очистке и извлечению металла. Для очистки и концентрирования золота в растворе будут использоваться различные методы. Эти методы включают цементацию цинка, электроосаждение и сорбцию активным углем. В процессе обработки золото осаждается или адсорбируется в растворе на специальных поверхностях, таких как цинк или активированный уголь, что позволяет очистить золото от остальных элементов, входящих в состав раствора, и получить чистый конечный продукт. Эффективность такой стадии очистки и извлечения золота оказывает существенное влияние на общую эффективность с точки зрения экономической целесообразности процесса, используемого при переработке руд.

2.2.1 Сравнительный анализ

Сравнительный анализ различных технологий переработки упорных руд подчеркивает важность выбора наиболее эффективного и экологически устойчивого метода для добычи золота из таких сложных и сульфидсодержащих материалов, как упорные руды. Традиционные методы, такие как обжиг и автоклавное окисление, демонстрируют высокую эффективность в разрушении сульфидов и освобождении золота, однако они сопряжены с высокими капитальными и операционными затратами, а также потенциальным загрязнением окружающей среды.

Технология Outotec BIOX®, основанная на биологическом окислении, представляет собой экологически безопасный процесс, который использует природные микроорганизмы для окисления сульфидов в рудах. Этот метод обещает снижение капитальных и операционных затрат по сравнению с традиционными методами, а также сокращение выбросов вредных веществ в окружающую среду. Хотя процесс может быть медленнее по сравнению с

обжигом и автоклавным окислением, его преимущества в экологической устойчивости и экономической эффективности делают его привлекательным выбором для переработки упорных руд. Однако необходимо обеспечить специфическое управление и контроль условий для оптимального роста и активности микроорганизмов.

Таблица 2.1 - Сравнительный анализ BIOX®.

Метод	Капитальные затраты	Операционные затраты	Экологические риски	Эффективность	Примечания
Обжиг	Высокие	Высокие	Высокие	Высокая	Значительное энергопотребление и выбросы
Автоклавное окисление	Очень высокие	Высокие	Умеренные	Очень высокая	Сложная технология, высокая стоимость эксплуатации
Обычное цианирование	Низкие	Низкие	Умеренные	Низкая (с упорными рудами)	Неэффективен для упорных руд
Бактериальное выщелачивание	Низкие	Низкие	Низкие	Умеренная	Длительное время обработки
Восстановительное выщелачивание	Умеренные	Умеренные	Умеренные	Специфичная	Ограниченное применение
Outotec BIOX®	Умеренные	Низкие	Низкие	Высокая	Экологически безопасная и экономически эффективная

Таким образом, технология Outotec BIOX® выделяется среди прочих методов своей экологической безопасностью, экономичностью и высокой эффективностью при переработке упорных руд, что делает её оптимальным выбором для таких месторождений, как Суздальское.

2.2.2 параметры при использовании технологии Outotec BIOX®

Технология BIOX ® имеет широкий спектр применений, при этом она требует строгого контроля и оптимизации различных параметров для обеспечения эффективного процесса биологического окисления и максимального извлечения золота. Ключевыми словами здесь являются параметры среды, химический состав, физические параметры, биологические параметры и рабочие параметры.

Температура: Температуру среды необходимо поддерживать в пределах 35-42°C; этот диапазон обеспечивает наибольшую активность микроорганизмов, окисляющих сульфиды в процессе BIOX ®. Кроме того, значение pH должно быть в пределах 1,8-2,2, поскольку отклонения могут существенно повлиять на активность бактерий как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

Аэрация и концентрация кислорода: Для аэробной работы бактерий необходимы надлежащий уровень аэрации и кислорода. Это поддерживается с помощью системы воздуходувок (компрессоров), а также надлежащей подачи и растворения кислорода в мякоти. Надлежащая аэрация и уровень кислорода обеспечивают аэробную жизнедеятельность бактерий, поддерживаемую с помощью воздуходувок и надлежащей подачи кислорода.

Химический состав среды: Среда, используемая для процесса, должна содержать несколько основных питательных веществ: азот, фосфор и микроэлементы, включая магний, калий, кальций и железо. Кроме того, необходимо контролировать содержание токсичных веществ: высокие концентрации опасны, поскольку они могут подавлять рост бактерий; в таких случаях следует применять нейтрализацию токсичных соединений.

Физические параметры: Размер частиц руды и плотность пульпы должны быть оптимальными. Оптимальный размер частиц руды составляет 80% минус 75 микрон, что увеличивает контакт между микроорганизмами и сульфидами, повышая скорость окисления. Плотность мякоти должна составлять 15-20% от массы сухого вещества, чтобы обеспечить эффективную аэрацию и циркуляцию мякоти.

Биологические параметры: Численность активных бактерий должна поддерживаться на уровне, необходимом для эффективного окисления сульфидов. Активация бактерий должна проводиться перед началом процесса и может занять несколько дней. Непрерывный мониторинг и поддержание здорового биоценоза являются ключом к стабильной работе установки.

Рабочие параметры: к ним относятся рециркуляция пульпы и продолжительность окисления. Рециркуляция части обработанной пульпы помогает поддерживать стабильные условия, такие как концентрация микроорганизмов, что важно для эффективного окисления. Типичное время обработки для полного окисления сульфидов составляет 3-5 дней, хотя фактическое время может варьироваться в зависимости от конкретного состава руды и условий процесса.

Эффективная эксплуатационная практика при использовании технологии Outotec BIOX® требует постоянного мониторинга всех этих параметров с использованием доступных аналитических приборов и методик. Гибкость и адаптация системы управления к изменяющемуся составу руды и условиям технологического процесса необходимы для эффективной практики. Извлечение золота из тугоплавких руд может быть значительно улучшено, если поддерживать оптимальные биологические условия окисления, гарантируя экономичность всего процесса.

2.2.3 Бактерии используемые в BIOX®

К сожалению, информация о конкретных видах бактерий, используемых на Суздальском месторождении золота для процесса BIOX®, может быть ограничена коммерческой конфиденциальностью. Тем не менее, можно предположить, что BIOX® включает применение аэробных мезофильных бактерий, которые могут окислять сульфиды при низком рН и высокой концентрации кислорода. Возможные бактерии могут включать разные виды *Thiobacillus*, *Leptospirillum* и других, способных окислять сульфидные минералы, такие как пирит, а также выделять кислоту и извлекать металлы из руды, в том числе золото. Они адаптированы к экстремальным условиям, таким как высокая кислотность и наличие токсичных металлов. Тем не менее, в различных условиях окружающей среды и средах культуры может быть использован разный состав бактерий по множеству причин, включая использованные методы добычи руды, физический состав месторождения золота и технологические решения используемой производящей компании. Однако инженеры и ученые продолжают работать над процессом BIOX® для увеличения его эффективности путем отбора и генетической модификации бактерий.

2.3 ASTER™ на руднике «Суздаль»

Установка ASTER™ на руднике "Суздаль" представляет собой инновационную технологию для обработки рудного сырья, содержащего тиоцианаты и цианиды. Проектная мощность установки составляет 530 м³/сут, а содержание тиоцианатов в питании варьируется от 1200 до 1500 мг/л, а цианидов от 2 до 5 мг/л. В 2010 году было подтверждено применимость технологии ASTER™ для очистки хвостовых вод от цианидов и тиоцианатов, что послужило началом комплексной программы испытаний. Успешные результаты этой программы, подтверждающие воспроизводимость результатов, позволили в 2011 году успешно ввести бактериальную культуру на установку ASTER™ в Казахстане.

В феврале 2013 года, на основе успешных полупромышленных испытаний и устойчивости результатов, было принято решение о масштабном внедрении технологии ASTER™ на руднике "Суздаль". Одной из ключевых задач проекта стало обеспечение достаточного разложения токсичных веществ в хвостовых растворах для возможности их рециркуляции на установку

BIOX®. Для этого требовалось снижение концентрации тиоцианатов в продукте установки ASTER™ до уровня менее 2 мг/л.

Пусконаладка установки ASTER™ на руднике "Суздаль" началась во II квартале 2013 года, и эксплуатация показала превосходные результаты, стабильно превышающие проектные требования.

Среди наиболее важных функций, выполняемых Aster, - управление данными, то есть сбор, хранение и анализ больших объемов информации. Система легко объединяет существующие источники данных, которые обеспечивают автоматический сбор информации, надежное хранение и доступ. Инструменты анализа данных помогут детально проанализировать добычные и геологические показатели, что поможет руководству принимать более точные решения. Другой важной функцией Aster является оптимизация процесса. Программное обеспечение позволяет создавать цифровые модели месторождений, проводить моделирование и прогнозирование показателей добычи. Это поможет оценить эффективность различных методов добычи и выбрать наиболее рациональные технологии. Управление производительностью. Aster помогает оптимизировать работу оборудования и процессов для достижения максимальных производственных показателей. Мониторинг в реальном времени. Система обеспечивает непрерывный мониторинг состояния оборудования и производственных процессов, автоматическое уведомление о превышении параметров или чрезвычайных ситуациях, а также создание отчетов для внутреннего использования и внешней отчетности. Все эти особенности обеспечивают своевременное распознавание и решение проблемы, поэтому объекты работают безопасно с надежностью к производству. В. Экологический мониторинг в Астере предполагает наблюдение за воздействием на окружающую среду и в то же время минимизацию негативного воздействия на экосистемы наряду с другими международными и национальными стандартами окружающей среды. Таким образом, компании могут работать легко, следуя всем законам по охране окружающей среды, дальнейшего сохранения природы. Компания недавно открыла шахту в Восточном Казахстане под названием Суздаль. Шахта в основном производит золото и полностью принадлежит Nordgold. В основном программа ориентирована на наблюдение за работой скважин и шахт; безупречная работа обеспечивает достижение высочайшей производительности используемого оборудования при разработке месторождения золота, а также на эксплуатационные параметры. Анализ производительности позволяет сравнивать различные способы добычи золота и выбор лучших технологий. Отчетность о результатах деятельности включает анализ данных и взвешенное принятие управленческих решений. Интеграция Aster с другими системами управления шахтами уменьшает параллелизм между системами и позволяет расширить координацию и обмен данными между различными системами. В Aster планирование и прогнозирование означают долгосрочное планирование развития месторождения на основе детального анализа информации и прогнозных моделей темпов добычи. Это

помогает нам в анализе эффективности запланированных мероприятий и в разработке стратегических решений на основе наиболее точных прогнозов. Программа способствует уменьшению возможного экологического ущерба за счет проведения количественного и качественного экологического мониторинга с помощью отслеживания сбросов и другого индикатора. Кроме того, эта программа помогает составлять отчеты, требуемые стандартами и требованиями экологических программ. В целом использование Aster на Суздальском руднике повышает эффективность добычи золота и обеспечивает безопасность производства и соблюдение экологических стандартов. Aster — это мощное программное обеспечение для управления и оптимизации процессов добычи полезных ископаемых. Когда он на месте, нет пути назад, и трудно представить, что жизнь компании в горнодобывающей промышленности сегодня протекает без такого программного обеспечения.

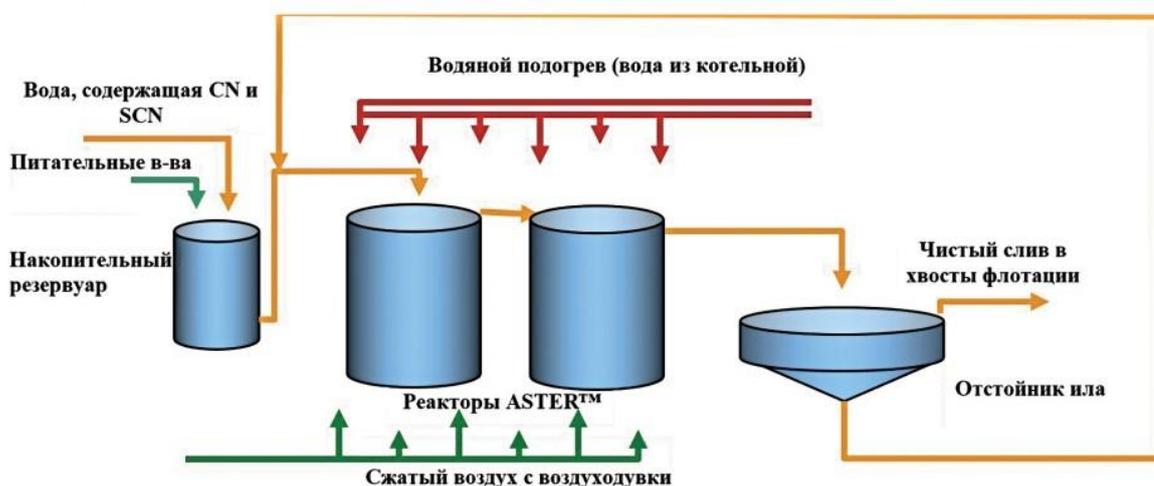


Рисунок 5 - Технологическая схема установки ASTER™ Суздаль

Установка HiTeCC рудника «Суздаль»

Важным открытием, характеризующимся высоким содержанием углеродсодержащих руд, является месторождение "Суздаль". Установка HiTeCC (High Temperature Caustic Conditioning). на этом руднике была установлено с целью оптимизации добычи и переработки руды. Применяемая технология переработки углеродсодержащих руд значительно увеличивает извлечение золота. Самое главное, что установка HiTeCC была оснащена технологией BIOX®, которая обеспечивает максимальное извлечение золота из сложных рудных материалов.

Установка HiTeCC работает по принципу высокотемпературной каустической обработки с несколькими основными этапами. Первый этап предполагает дробление и измельчение рудного материала до необходимой фракции, чтобы после этого получить наилучшие результаты для следующих операций. После этого происходит прокачивание руды при высоких температурах в окислительной атмосфере. В ходе данного процесса

происходит разложение углеродсодержащих соединений, которые делают золото менее доступным для дальнейшего извлечения. Материал дополнительно обрабатывается каустиком при высоких температурах, что позволяет удалить остаточные углеродистые соединения. Для извлечения золота на заключительной стадии из таких продуктов используются другие методы, такие как цианирование или флотация. Применение технологии NiTeCC на Суздальском руднике дает ряд ключевых преимуществ: она обеспечивает увеличение извлечения золота из сложных углеродистых руд, что существенно повышает экономическую целесообразность процесса.

Снижение расхода реагента вследствие рационального использования в процессе дополняет данный безусловно положительный эффект. Данная технология сокращает выбросы углекислого газа и снижает воздействие на окружающую среду. Установка NiTeCC может быть адаптирована для переработки различных видов руды, что расширяет возможности ее применения на других перерабатывающих предприятиях.

В местах, где BIOX перерабатывает минералы, содержащие сульфиды, NiTeCC будет извлекать углеродистые вещества, обеспечивая максимальное извлечение золота. Таким образом, использование технологии NiTeCC в сочетании с процессом BIOX оптимизировано для обеспечения наиболее эффективного производственного процесса, а также для повышения экономического эффекта и устойчивости добычи золота.

Ввод в эксплуатацию установки NiTeCC на Суздальском руднике является событием стратегического значения для горнодобывающей отрасли Казахстана. Использование технологических приемов с применением технологии BIOX® обеспечивает максимальный объем при улучшенном качестве извлечения золота, что формирует экономическую эффективность предприятия. Возможно, в рамках этого проекта на Суздальском месторождении будут внедрены лучшие технические решения, которые можно будет применить на других месторождениях. Установка NiTeCC на Суздальском руднике повышает не только производительность, но и рентабельность добычи золота; однако, в то же время, это повышает экологическую безопасность производства и демонстрирует преимущества использования инновационных технологий в горнодобывающей промышленности.

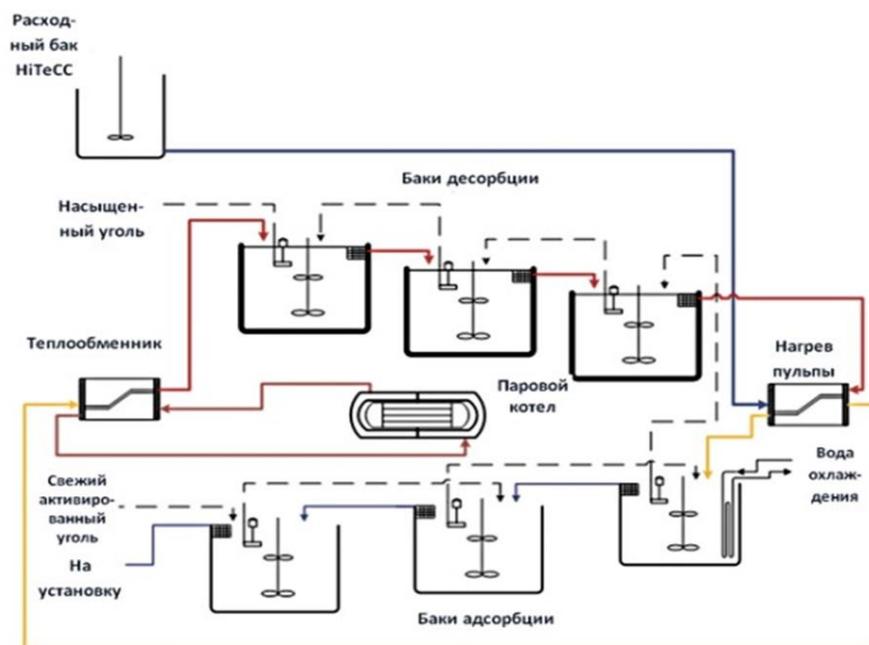


Рисунок 6 - Технологическая схема установки NiTeCC.

2.5 Технология MesoTherm BIOX®

Технология MesoTherm BIOX® представляет собой инновационный комбинированный процесс биоокисления, разработанный компанией BIOMIN для решения проблем, связанных с высоким расходом цианида на установках BIOX®. Данная технология использует мезофильные бактерии на первичной стадии окисления и термофильные бактерии для достижения почти полного конечного окисления сульфидной серы. Первичная стадия окисления, осуществляемая мезофильными бактериями, протекает при умеренных температурах (20-45°C) и направлена на начальное окисление сульфидной серы до промежуточных продуктов. Затем следует конечное окисление, при котором термофильные бактерии, оптимально работающие при высоких температурах (45-80°C), завершают процесс, превращая сульфидную серу в безопасные конечные продукты, такие как сульфаты.

Основным преимуществом использования технологии MesoTherm является значительное снижение расхода цианида при выщелачивании продукта: до 50% по сравнению с традиционным процессом BIOX®, что позволяет сократить потребление цианида с 20 кг/т до 8-10 кг/т. Это достигается благодаря более

полному окислению сульфидов на термофильной стадии, что устраняет недоокисленные формы серы. Важно отметить, что данный подход не только снижает эксплуатационные затраты, но и повышает экологическую безопасность процессов. Технология MesoTherm BIOX® применяется в различных отраслях промышленности, таких как горная промышленность, для обработки сульфидных руд и повышения извлечения золота, очистка сточных вод и утилизация отходов, содержащих серу. Примером успешного промышленного применения аналогичной технологии является проект компании ВНРBilliton на руднике Чукикамата в Чили, где термофильные бактерии используются в технологии BioSOR™ для производства медного катода с проектной мощностью 20 000 тонн в год. Лабораторные циклические испытания показали, что при высоких температурах достигается более полное окисление сульфидов, снижая количество недоокисленных форм серы, что подтверждается пилотными испытаниями, установившими, что использование сжатого воздуха для процесса биоокисления является достаточным и обеспечивает устойчивый режим эксплуатации при содержании твердой фазы 20%. Таким образом, технология MesoTherm BIOX® представляет собой передовое решение для эффективного и экологически безопасного окисления сульфидной серы, снижая эксплуатационные затраты и улучшая показатели извлечения полезных металлов.

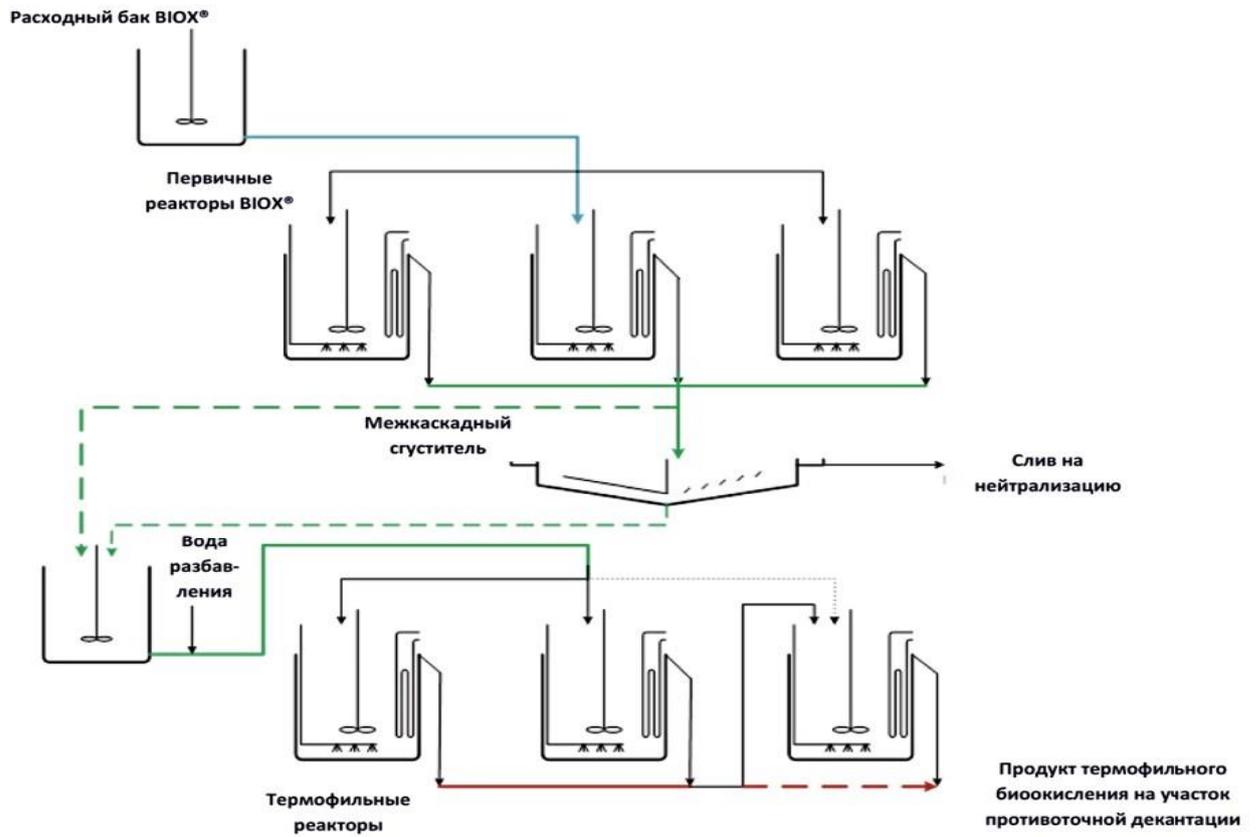


Рисунок 7 - Технологическая схема MesoTherm BIOX

3.Экономическая часть

Технологии переработки руд с каждым годом приобретают все большее значение в горнодобывающей промышленности. Одним из наиболее инновационных методов является биогидрометаллургическое выщелачивание сульфидных золотосодержащих руд. В этой части мы проверим экономическую эффективность данной технологии по сравнению с традиционными способами.

Основные преимущества технологии БХВ: она отличается низкими капитальными и эксплуатационными затратами, не оказывает негативного воздействия на окружающую среду и эффективна при переработке низкосортных руд, которые не так эффективны при обработке традиционными технологиями.

Эксплуатационные расходы низкие, поскольку BIOX® отличается низким потреблением реагентов и энергии. Преимущество БХВ заключается в экономической выгоде от высокой добычи и низких затрат на переработку; ориентировочно, рентабельность такого метода разработки может составлять 15–20%. Окупаемость может варьироваться в зависимости от проекта и местоположения, но, согласно данным исследования Сабодала-Массава в Сенегале, первоначальные экономические оценки показали, что период окупаемости для интеграции технологии BIOX® в их перерабатывающие предприятия может быть относительно коротким. Например, этот проект прогнозировал положительный денежный поток и общий период окупаемости около 2–3 лет из-за эффективности данной технологии, которая может перерабатывать упорные золотосодержащие минералы, что привлекательно для горнодобывающих компаний.

По сравнению с другими традиционными методами, цианидное выщелачивание и другие традиционные методы экстракции требуют больших капитальных вложений для строительства установки и приобретения дорогостоящего оборудования. Кроме того, используемые расходные материалы и энергозатраты приводят к очень высоким эксплуатационным расходам. Сравнительный анализ показывает, что капитальные затраты на традиционные методы в 1,5–2 раза выше, чем на БХВ. Эксплуатационные расходы могут быть на 20–30% выше из-за использования токсичных реагентов, что требует дополнительных мер безопасности и организации утилизации отходов. Экономическая эффективность применения традиционных методов повысилась при переходе к биогидрометаллургическому выщелачиванию, но именно переработка низкосортных руд сопряжена с высокими затратами. Хотя технология БХВ позволяет перерабатывать такие руды с минимальными затратами, традиционные методы требуют большого расхода реагентов и энергии для достижения аналогичных результатов.

Технология биогидрометаллургического выщелачивания уже работает в различных частях света: Австралии, Южной Африке и США. До сих пор она применялась в большинстве случаев при добыче сульфидных руд с высоким содержанием золота. Например, Barrick Gold и Newmont Mining применили эту технологию на своих объектах и в результате получили значительные экономические преимущества. Экономические результаты внедрения БХВ на Суздальском руднике демонстрируют, что использование этой технологии очень эффективно. Предполагается, что с внедрением этой технологии себестоимость изготовления одной унции золота снизится на 15-20%, тем самым увеличив прибыль компании. Успешный опыт, накопленный при применении БХВ на Суздальском руднике, способствует дальнейшему распространению этой технологии в других регионах и странах. Таким образом, потенциал разработки и внедрения БХЛ связан с дальнейшим совершенствованием биотехнологий и снижением затрат на оборудование. Исследования в области генной инженерии и микробиологии, возможно, позволят вывести новые штаммы бактерий, способные перерабатывать руды с еще большей скоростью и эффективностью. Дополнительная ценность БХЛ заключается в том, что она учитывает глобальные изменения в мире и повышает стандарты безопасности для природы, способствуя стабильности горнодобывающей промышленности в настоящее время. Ожидается также, что эта технология будет распространена на новые типы руд и месторождений, снизит затраты и повысит эффективность добычи драгоценных металлов в будущем.

4. Техника безопасности и экология

4.1 Техника безопасности и экология на примере установок NiTeCC, ASTER™ и Outotec BIOX® на Суздальском месторождении

Огромное количество проблем, связанных с промышленной безопасностью и экологией в сфере современного производства, делает создание и эксплуатацию высокотехнологичных объектов для эффективного и безопасного производства одним из основных направлений. Особое внимание уделяется обеспечению техники безопасности и минимизации воздействия на окружающую среду. В ходе исследования оцениваются характеристики установок NiTeCC, ASTER™ и Outotec BIOX® на Суздальском месторождении и предлагаются меры по обеспечению безопасности и охране окружающей среды.

Установка NiTeCC (высокотемпературная каустическая обработка) предназначена для переработки золотосодержащих и серебросодержащих руд. Основным методом переработки такого типа является высокотемпературная обработка минерала, пропитанного химическими реагентами, что позволяет эффективно извлекать драгоценные металлы. Он оснащен автоматической системой управления технологическим процессом, обеспечивающей безопасность и присущую ему стабильность. Меры безопасности при доступе людей были обеспечены за счет регулярного обучения персонала, выдачи защитного снаряжения и оборудования для работы в условиях высокой температуры с агрессивными веществами, а также автоматизации с системами контроля для исключения несчастных случаев. В Суздальском месторождении также проводятся плановые и внеплановые проверки оборудования, соответствующие условиям работы, а также регулярный пересмотр протокола.

Экологические аспекты применяемой технологии NiTeCC включают в себя возможность снижения выбросов вредных веществ за счет грамотного управления технологическими процессами, уменьшения экологического следа за счет переработки отходов производства и снижения потребления воды за счет применения систем циркуляции воды с замкнутым циклом. В равной степени ключевым аспектом является сокращение объема отходов за счет поддержки хорошо отлаженной системы переработки отходов и использования отходов в качестве вторичного сырья. Это помогает снизить нагрузку на окружающую среду, а также способствует оптимизации использования ресурсов.

ASTER™ это сооружения для очистки хвостохранилищ от активного ила предназначены для переработки сточных вод и хвостохранилищ, образующихся при добыче и переработке руды. Метод очистки основан на принципе обработки активным илом для удаления загрязняющих веществ из сточных вод. Эффективность удаления тяжелых металлов и других

загрязняющих веществ в этой установке ASTER™ высока, что в целом очень важно для экологической безопасности производства.

Меры предосторожности при эксплуатации: мониторинг и поддержание состояния оборудования; обучение персонала безопасному использованию и обслуживанию оборудования; использование автоматизированных систем для контроля качества очистки сточных вод. Внедрена система экстренного реагирования, позволяющая сократить последствия потенциальных инцидентов в сочетании со своевременным реагированием на любые отклонения от штатного режима работы.

Экологические аспекты использования установки ASTER™ заключаются в снижении загрязнения воды за счет эффективной очистки сточных вод, повышении уровня экологической безопасности региона за счет снижения уровня загрязнения, применении технологии замкнутого водооборота для минимизации водопотребления и методов биологической очистки для восстановления природных экосистем и биоразнообразия.

На установке Outotec BIOX® гарантируется минимальное воздействие на окружающую среду, по причине использования микроорганизмов, не вредных окружающей среде. Меры предосторожности во время реальных операций будут включать мониторинг и управление микробиологическими процессами для предотвращения отклонений, обучение персонала безопасному обращению с биологическими агентами и реагентами, а также ношение средств индивидуальной защиты при работе с химическими веществами и микроорганизмами. Эффективная программа частых аудитов и проверок на соответствие требованиям также является частью того, что обеспечивает высокий уровень безопасности на производстве. Другие экологические эффекты технологии, использующей установку Outotec BIOX®, включают сокращение использования химических реагентов за счет внедрения биотехнологий; это сокращает выбросы вредных веществ в атмосферу и водные ресурсы, а также сокращает образование отходов, поскольку используется большая часть переработанной руды. Процессы биоокисления могут даже снизить токсичность сточных вод, что позволяет значительно снизить воздействие на окружающую среду.

Суздальское месторождение — это внедрение установок NiTeCC, ASTER™ и BIOX® в рамках общей политики повышения безопасности и качества окружающей среды на базе производства. В то же время регулярно проводятся работы по мониторингу окружающей среды с целью оценки влияния производственного процесса на окружающую среду, а также разработки систем снижению негативного воздействия. Примерами таких систем являются замкнутые системы циркуляции воды, которые, сокращая общий объем сбрасываемых сточных вод за счет сокращения расхода воды и ее использования, тем самым уменьшают количество образующихся сточных вод; внедренные технологии переработки отходов с уменьшением объема захоронения; а также отходы, используемые в качестве вторичного сырья. Перечисленные меры помогают сократить количество образующихся сточных

вод и способствуют не только охране окружающей среды, но и снижению производственных затрат.

Таким образом, использование высокотехнологичного оборудования на промышленных объектах поднимает реальные вопросы безопасности и охраны окружающей среды. Установки HiTeCC, ASTER™ и Outotec BIOX®, расположенные на Суздальском месторождении, отличаются высокими показателями безопасности и экологичности, поскольку они играют важную роль в сохранении окружающей среды и улучшении условий труда. Взаимосвязь эффективного производства с сохранением природы становится значимой с внедрением таких технологий, что важно в данном случае для устойчивого развития. Использование современных методов обеспечения безопасности и охраны окружающей среды на предприятии — степень надежности и экологичности производственных процессов — несомненно, высока и, таким образом, должна привести к сохранению природных ресурсов, обеспечивая устойчивое развитие региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе были рассмотрены современные тенденции в применении бактериально-химического выщелачивания сульфидных золотосодержащих руд, такие как MesoTherm BIOX® HiTeCC, ASTER™ и Outotec BIOX® на Суздальском месторождении. Их экономическая эффективность, экологическую безопасность и эффективность в извлечение золота. Таким образом, применение технологий бактериально-химического выщелачивания на Суздальском месторождении доказало свою экономическую и экологическую эффективность. Эти технологии являются перспективными для дальнейшего развития золотодобывающей промышленности и могут быть рекомендованы для внедрения на других месторождениях с аналогичными характеристиками.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турысбекова Г.С. Монография «Золото: Новые сырьевые источники, вторичная металлургия и аффинаж», 352 стр, 2016 г., Алматы
2. Турысбекова Г.С. Монография «Золото: Инновации в химии и металлургии», 652 стр, 2015 г
3. A new strain *Leptospirillum ferriphilum* YTW315 for bioleaching of metal sulfides ores
4. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ СУЛЬФИДНЫХ РУД Т.С.ХАЙНАСОВА
5. Технологии компании Biomin для оптимизации извлечения золота из упорных золотых руд
6. Metals tolerance in moderately thermophilic isolates from a spent copper sulfide heap, closely related to *Acidithiobacillus caldus*, *Acidimicrobium ferrooxidans* and *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*
7. The Project of BIOX® Plant to Process Oxidizing Sulphide Ore with Flotation and Cyanidation
8. <https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniya-sulfidnyh-mineralov.html>
9. <https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35843-mehanizm-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniya-sulfidnyh-mineralov.html>
10. <https://metalspace.ru/education-career/education/referat/620-razvitie-tekhnologii-bakterialnogo-vyschelachivaniya-upornykh-zolotosoderzhashchikh-kontsentratov.html>
11. <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-napravleniya-v-razvitiibiohidrometallurgii>
12. <https://cyberleninka.ru/article/n/modifitsirovanie-pitatelnyh-sred-dlya-mikroorganizmov-v-tselyah-uluchsheniya-fiziko-himicheskikh-parametrov-biovyschelachivaniya>

РЕЦЕНЗИЯ

на Дипломную работу

Алиев Астан Исмаилович
(Ф.И.О. обучающегося)

6B05101 Биотехнолог
(инфо и наименование ОП)

На тему: Применение технологии бактериальное-химического выщелачивания
для сульфидных золотосодержащих руд

Выполнено:

- а) графическая часть на _____ листах
б) пояснительная записка на _____ страницах.

Оценка работы

Дипломная работа посвящена применению технологии бактериально-химического выщелачивания (БХВ) для сульфидных золотосодержащих руд на Суздальском месторождении. Тема актуальна в свете современных требований к экологичности и эффективности добычи полезных ископаемых. В работе рассмотрены методы и текущие тенденции в разработке месторождения и добыче металла биотехнологическим способом. В качестве сравнения приведена технология Технология MesoTherm BIOX®, а также сравнительные данные по применяемым технологиям цианидного выщелачивания, автоклавной проработке руды и окислительного обжига. Проанализированы данные по основным типам микроорганизмов, используемых в металлургии золота и механизмам реакций, сред и основных влияющих на процессы факторов. Экспериментальная часть содержит описание технологических схем, используемых на руднике и параметров технологий Solutec BIOX®.

Работа имеет четкую структуру, включающую введение, литературный обзор, экспериментальную часть, экономический анализ и раздел по технике безопасности и экологии.

Оценка работы

Дипломная работа выполнена на уровне, достаточном для получения квалификации «Бакалавр» с оценкой «отлично» 90 баллов.

Рецензент:

в.п.с. кандидат тех. наук

Алиева О.В.

(подпись, по-русски, латиницей)

(подпись)

Ф.И.О.

«13» июля

2024 г.

Ф КазНТУ 706-17. Рецензия

Подпись: <u>Алиевой О.В.</u>
расшифровка подписи
Фамилия инициалы / Ученый секретарь
«Металлургия золота» КазНТУ имени К.И.Сатпаева
«13» июля 2024 г. <u>Алиева</u>

Отзыв научного руководителя

на Дипломную работу

Алиев Астан Исманлович
(Ф.И.О. обучающегося)

6B05101 Химическая и биохимическая инженерия
(шифр и наименование ОП)

На тему: Применение технологии бактериальное-химического выщелачивания
для сульфидных золотосодержащих руд

Выполнено:

- а) графическая часть на _____ листах
б) пояснительная записка на _____ страницах

Замечания к работе

Дипломная работа посвящена применению технологии бактериально-химического выщелачивания (БХВ) для сульфидных золотосодержащих руд, особенно на примере Суздальского месторождения. Тема является актуальной в контексте современных требований к экологии и эффективности добычи полезных ископаемых. Применение БХВ позволяет снизить экологическое воздействие на окружающую среду. Также технология позволяет уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты за счет использования природных микроорганизмов. Автор рассматривает инновационные методы и современные тенденции в области БХВ, что подчеркивает новизну исследования. Работа имеет структуру соответствующую требованиям; введение, литературный обзор, экспериментальная часть, экономический анализ и разделы по технике безопасности и экологии. Введение описывает актуальность, цели и задачи исследования. Литературный обзор охватывает роль микроорганизмов в биовыщелачивании, механизмы их действия и применяемые технологии. В экспериментальной части подробно рассматриваются оборудование и материалы, используемые на Суздальском месторождении. Экономический раздел и раздел по технике безопасности и экологии дают комплексное представление об эффективности и безопасности методов. В целом, работа демонстрирует необходимый уровень инженерной проработки темы и значительный практический потенциал.

Оценка работы

Дипломная работа выполнена на уровне, достаточном для получения квалификации «Бакалавр» с оценкой «отлично» 90 баллов.

Научный руководитель

(подпись, за печатью, датой)



Ф. И.О.

2024 г.

Ф КазНТУ 706-17. Пеннинг

Курсовая работа
исполнитель / автор
Татьяна Казы / Ученик-соратник
«Исследовательский центр биотехнологий» АҚ
13.05.2024 г. Казы

5	http://revolution.alibest.ru/biology/00516408_0.html	23	0.32 %
6	http://revolution.alibest.ru/biology/00516408_0.html	19	0.27 %
7	http://revolution.alibest.ru/biology/00516408_0.html	15	0.21 %
8	https://forpost-sz.ru/sites/default/files/inline-uploads/2019/03/7527-17843-1-qb.pdf	13	0.18 %
9	http://revolution.alibest.ru/biology/00516408_0.html	13	0.18 %
10	http://revolution.alibest.ru/biology/00516408_0.html	12	0.17 %

z bazy RefBooks (0.00 %)

LP	TYTUŁ	IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW)
----	-------	--------------------------------

z bazy macierzystej (0.00 %)

LP	TYTUŁ	IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW)
----	-------	--------------------------------

z Programu Wymiany Baz (0.00 %)

LP	TYTUŁ	IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW)
----	-------	--------------------------------

z Internetu (4.19 %)

LP	ADRES URL ŹRÓDŁA	IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW)	
1	http://revolution.alibest.ru/biology/00516408_0.html	166 (12)	2.32 %
2	https://docplayer.ru/58635417-Suzdalskoe-zoloto-sulfidnoe-mestorozhdenie-y-chemoslancevyh-tolshchah-vostochnogo-kazahstana.html	53 (2)	0.74 %
3	https://www.metso.com/ru/insights/case-studies/mining-and-metals/improving-overall-gold-recovery-at-nordgolds-suzdal-mine-kazakhstan/	34 (2)	0.48 %
4	https://official.satbayev.university/download/document/11286/%D0%90%D0%BB%D0%B4%D0%B0%D1%88%D0%B5%D0%B2%D0%B0%20%D0%9D%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80%D0%BA%D0%B5%2014.05.2019.pdf	34 (1)	0.48 %
5	https://forpost-sz.ru/sites/default/files/inline-uploads/2019/03/7527-17843-1-qb.pdf	13 (1)	0.18 %

Lista zaakceptowanych fragmentów (brak zaakceptowanych fragmentów)

LP	TREŚĆ	IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW)
----	-------	--------------------------------

Применение технологии бактериально-химического выщелачивания для сульфидных золотосодержащих руд

Анотация

В данной дипломной работе рассматривается применение современных технологий бактериально-химического выщелачивания сульфидных золотосодержащих руд. Исследования проводились с учетом текущих тенденций в БХВ-технологиях и инновационных методах. Особое внимание уделено Суздальскому месторождению, где были проанализированы используемые технологии и их преимущества в экономическом и экологическом аспектах. В работе подробно изучены технологии, применяемые на Суздальском месторождении, и на основе проведенного анализа выявлены значительные экономические преимущества бактериально-химического выщелачивания, а также его высокая экологичность. Результаты исследования демонстрируют перспективность использования БХВ-технологий для эффективного и экологически безопасного извлечения золота из сульфидных руд.

Annotation

In this thesis the application of modern technologies of bacterial-chemical leaching sulfide gold-containing ores is considered. The research was based on current trends in SMC technologies and innovative methods. Special attention is paid to Suzdal field, where the used technologies and