

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

Тарасов Давид Евгеньевич

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование роста и развития *Acidithiobacillus Ferrooxidans* при
окислении сульфидных минералов»

6B05101– «Химическая и биохимическая инженерия»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела
Кафедра химической и биохимической инженерии

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
«Химическая и биохимическая
инженерия»
Доктор PhD

А. А. Амитова



«13» сентября 2024г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование роста и развития Acidithiobacillus Ferrooxidans при окислении
сульфидных минералов»

По образовательной программе 6B05101 – Химическая и биохимическая инженерия

Выполнил

Тарасов Д.Е.

Рецензент
Канд. техн. наук

Атанова О. В.

«13» сентября 2024 г.



Научный руководитель
Канд. техн. наук

Турысбекова Г.С.

«13» сентября 2024 г.



Алматы 2024

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретическая часть	15.04.24г.	Выполнено
Технологическая часть	20.04.24г.	Выполнено
Экспериментальная часть	25.04.24г.	Выполнено
Экологическая и экономическая части	20.04.24г.	Выполнено

Подписи
консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Теоретическая часть	Турысбекова Г.С, канд.техн.наук, профессор	13.06.24г.	
Исследовательская часть	Турысбекова Г.С, канд.техн.наук, профессор	13.06.24г.	
Нормоконтролер	Турысбекова Г.С, канд.техн.наук, профессор	13.06.24г.	

Научный руководитель



Турысбекова Г.С.

Задание принял к исполнению обучающийся

Тарасов Д.Е.

Дата

« ___ » _____ 2024г

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1 Литературный обзор	3-8
1.1 Общая характеристика проблемы	3
1.2 Актуальность темы	3-4
1.3 Цель и задачи исследования	4-5
1.4 История изучения <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	5-6
1.5 Роль <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> в окислении сульфидных минералов	6
1.6 Предыдущие исследования в этой области	6-7
1.7 Биоликвация	7-8
2 Методология	9-15
2.1 Среда 9Ж	9
2.2 Оптимальные параметры	9-10
2.3 Биохимические реакции	10
2.4 Генезис	10-11
2.5 Морфология	11-13
2.6 Активирование бактерий	13-14
2.7 Культивирование бактерий	14-15
3 Технологическая часть	16-19
3.1 Характеристика месторождения	16
3.2 Основные параметры технологического процесса	16
3.3 Экспериментальная установка и проведение исследований	17
3.4 Результаты исследований	17-18
3.5 Экономическая часть	18-19
3.6 Экологический эффект	19
Заключение	20
Литература	21

ВВЕДЕНИЕ

Acidithiobacillus ferrooxidans, бактерия, принадлежащая к группе грамотрицательных, хемолитоавтотрофных и кислотофильных организмов, играет важную роль в процессе окисления сульфидных минералов. Исследования в этой области имеют значительное промышленное и экологическое значение, поскольку они позволяют развивать технологии биоликации и биогорного дела, которые способствуют извлечению металлов из руд и очистке окружающей среды от загрязнений.

Бактерия *Acidithiobacillus ferrooxidans* имеет уникальную способность катализировать биохимические реакции в экстремально кислых средах, что делает её ценным объектом для различных научных исследований. Её способность окислять Fe^{2+} и сульфидные соединения используется в промышленности для извлечения металлов из руд, таких как медь. Этот процесс, известный как биоликация, позволяет извлекать металлы из низкосортных руд, что повышает рентабельность добычи.

Изучение роста и развития *Acidithiobacillus ferrooxidans* в различных условиях окисления сульфидных минералов также важно для понимания её роли в биогеохимическом цикле питательных веществ и металлов в кислых условиях. Несмотря на значительное количество исследований, многие вопросы о её роли в окислении сульфидных минералов остаются открытыми. Недостаток генетических инструментов и информации о физиологии *A. ferrooxidans* препятствует углубленному пониманию её функционирования.

Цель данного исследования заключается в изучении и оптимизации процесса биоликации сульфидных минералов с использованием *Acidithiobacillus ferrooxidans* на примере Акбакайского месторождения. Для достижения этой цели проведен обзор научной литературы, собраны и проанализированы данные о росте и развитии данной бактерии в различных условиях окисления сульфидных минералов. Были проведены эксперименты для наблюдения за ростом и развитием *Acidithiobacillus ferrooxidans* при окислении сульфидных минералов, а полученные данные и результаты экспериментов подвергнуты анализу.

1 Литературный обзор

1.1 Общая характеристика проблемы

Acidithiobacillus ferrooxidans является грамотрицательной, хемолитоавтотрофной, кислотофильной бактерией. Он преобладает в природных условиях, связанных с пиритовыми рудными телами, угольными месторождениями и их окисленными стоками. *A. ferrooxidans* может обитать в крайне кислых условиях, фиксируя CO_2 и азот, и получая энергию от окисления Fe^{2+} с использованием либо нисходящего, либо восходящего электронного транспортного пути и от окисления сниженного серы. В процессе окисления Fe^{2+} большинство электронов передаются к O_2 вдоль потенциального градиента, в то время как небольшое количество электронов передается обратно вдоль потенциального градиента. *A. ferrooxidans* играет важную роль в биогеохимическом цикле питательных веществ и металлов в кислых условиях. Он также является важным участником микробных консорциумов, используемых для промышленного восстановления меди через процесс, известный как биоликвация или биогорное дело. Однако, несмотря на его важность, система генетической манипуляции для *A. ferrooxidans* пока не развита, что затрудняет тщательное изучение его физиологии. Кроме того, вопросы о его роли в окислении сульфидных минералов остаются открытыми, и исследования в этой области продолжаются.

1.2 Актуальность темы

Бактерия *Acidithiobacillus ferrooxidans* занимает видное место в промышленных, биогеохимических и экологических процессах, связанных с окислением сульфидных минералов. Ее способность катализировать биохимические реакции в экстремально кислой среде делает ее ценным объектом исследования для различных областей науки.

A. ferrooxidans является ключевым игроком в биоликвации, широко используемой в горнодобывающей промышленности для извлечения меди. Она окисляет неорганическое железо и серу, содержащиеся в медесодержащей руде, что приводит к высвобождению меди в раствор. Этот процесс имеет большое экономическое значение, поскольку позволяет извлекать металлы из низкосортной руды, что повышает рентабельность добычи.

A. ferrooxidans играет важную роль в биогеохимическом цикле питательных веществ и металлов в кислых условиях. Она окисляет сульфидные минералы и способствует выщелачиванию токсичных металлов, таких как медь и железо, в

окружающую среду. Этот процесс поддерживает биогеохимический баланс и играет важную роль в поддержании экосистем.

A. ferrooxidans обитает в кислотных дренажных водах, образующихся в результате добычи ископаемых, таких как пиритовые рудные тела и угольные месторождения. Ее активность в этих средах ускоряет окисление сульфидных минералов, что может привести к образованию кислотных стоков и ухудшению качества воды и почвы. Исследование роли *A. ferrooxidans* в этих процессах имеет решающее значение для разработки стратегий управления и минимизации экологического воздействия добычи руды.

Несмотря на свою важность, *A. ferrooxidans* остается относительно неизученным организмом. Недостаток генетических инструментов и информации о физиологии препятствует углубленному пониманию ее роли в окислении сульфидных минералов. Исследования в области генетической манипуляции и физиологии имеют решающее значение для дальнейшего изучения этого важного организма.

Исследование *Acidithiobacillus ferrooxidans* имеет важное значение для понимания различных процессов, связанных с биоликвацией, биогеохимией и экологией. Его промышленное значение, роль в биогеохимическом цикле и экологические последствия требуют дальнейшего исследования. Разработка генетических инструментов и углубление знаний о его физиологии помогут в раскрытии новых аспектов этого уникального организма и его влияния на окружающую среду и промышленность.

1.3 Цель и задачи исследования

Исследование посвящено изучению и оптимизации процесса биоликвации сульфидных минералов на Акбакайском месторождении с целью оценки эффективности использования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* для окисления сульфидных руд. Важным аспектом исследования является также оценка экологического и экономического воздействия биоликвации, что включает определение влияния процесса на окружающую среду и экономическую целесообразность его внедрения.

Первым этапом исследования является геологическая характеристика Акбакайского месторождения. Необходимо провести обзор геологического строения и минералогического состава руд месторождения, а также определить основные рудные тела и их характеристики, включая содержание основных полезных компонентов.

Далее требуется определить основные параметры технологического процесса биоликвации. Это включает выбор оптимальных условий для роста и активности бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*, таких как температура, pH и концентрация

Fe^{2+} . Также необходимо разработать экспериментальные установки для проведения лабораторных исследований.

Следующим шагом является проведение лабораторных исследований по биоликвации. В ходе экспериментов следует оценить динамику изменения концентраций Fe^{2+} и Fe^{3+} в растворе, а также изменение рН среды в процессе окисления сульфидных руд.

Полученные данные будут подвергнуты анализу. Необходимо построить графики и составить таблицы, иллюстрирующие процесс биоликвации. На основе анализа данных можно будет определить эффективность окисления сульфидных минералов и выработать рекомендации по оптимизации процесса.

Особое внимание следует уделить экономической оценке процесса биоликвации. Для этого необходимо рассчитать затраты на проведение процесса и сравнить экономическую эффективность биоликвации с традиционными методами переработки сульфидных руд. Также следует оценить общую прибыль и экономическую целесообразность внедрения биоликвации на Акбакайском месторождении.

Экологическая оценка процесса биоликвации включает определение его влияния на окружающую среду, включая выбросы вредных веществ и загрязнение водоемов и почвы. На основе проведенного анализа необходимо разработать рекомендации по экологически безопасной эксплуатации месторождения и рекультивации нарушенных земель.

Заключение исследования должно содержать сформулированные выводы по результатам проведенной работы. Также необходимо выработать рекомендации по дальнейшему развитию и внедрению технологии биоликвации на Акбакайском месторождении и других аналогичных объектах.

1.4 История изучения

Acidithiobacillus ferrooxidans, изначально названный *Thiobacillus ferrooxidans*, был впервые выделен Колмером и Хинклом в 1947 году из кислых стоков шахт. Это грамотрицательный, хемолитоавтотрофный, кислотофильный аэроб. Он использует CO_2 как единственный источник углерода, зависит от окисления Fe^{2+} или S и сниженных соединений серы для получения энергии. В процессе окисления Fe^{2+} большинство электронов передаются к O_2 вдоль потенциального градиента, в то время как небольшое количество электронов передается обратно вдоль потенциального градиента. NAD(P)H, сгенерированный в последнем процессе, участвует в фиксации и аэробном метаболизме CO_2 . *A. ferrooxidans* существует как различные геномвары, и его размер генома составляет 2.89–4.18 Мб. Хемотаксическое движение *A. ferrooxidans* регулируется кворум-сенсингом. *A. ferrooxidans* играет важную роль в промышленном восстановлении меди через

процесс, известный как биоликвация или биогорное дело. Он также играет важную роль в биогеохимическом цикле питательных веществ и металлов в кислых условиях. Однако, несмотря на его важность, система генетической манипуляции для *A. ferrooxidans* пока не развита, что затрудняет тщательное изучение его физиологии. Кроме того, вопросы о его роли в окислении сульфидных минералов остаются открытыми.

1.5 Роль в окислении сульфидных минералов

Acidithiobacillus ferrooxidans играет важную роль в окислении сульфидных минералов. Этот процесс важен для биогеохимического цикла питательных веществ и металлов в кислых условиях. *A. ferrooxidans* использует Fe^{2+} или S и сниженные соединения серы как источник энергии. В процессе окисления Fe^{2+} большинство электронов передаются к O_2 вдоль потенциального градиента, в то время как небольшое количество электронов передается обратно вдоль потенциального градиента. NAD(P)H, сгенерированный в последнем процессе, участвует в фиксации и аэробном метаболизме CO_2 . *A. ferrooxidans* также играет важную роль в промышленном восстановлении меди через процесс, известный как биоликвация или биогорное дело. Этот процесс включает в себя окисление железа и серы, что приводит к высвобождению меди из руды. Для выделения штаммов бактерии, активных в окислении сульфидных минералов и устойчивых к ионам тяжелых металлов, также используются сульфидные минералы.

1.6 Предыдущие исследования

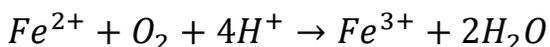
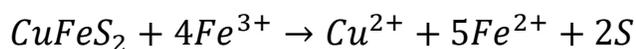
Acidithiobacillus ferrooxidans, изначально названный *Thiobacillus ferrooxidans*, был впервые выделен Колмером и Хинклом в 1947 году из кислых стоков шахт. Это грамотрицательный, хемолитоавтотрофный, кислотофильный аэроб. Он использует CO_2 как единственный источник углерода, зависит от окисления Fe^{2+} или S и сниженных соединений серы для получения энергии. *A. ferrooxidans* играет важную роль в промышленном восстановлении меди через процесс, известный как биоликвация или биогорное дело. Этот процесс включает в себя окисление железа и серы, что приводит к высвобождению меди из руды. В 2008 году было опубликовано исследование, посвященное метаболизму *A. ferrooxidans*. В этом исследовании был проанализирован геном штамма *A. ferrooxidans* ATCC 23270, чтобы определить общие особенности и создать основу для метаболической реконструкции *in silico*. В 2018 году был опубликован обзор, посвященный

потенциальному применению *A. ferrooxidans*. В этом обзоре были рассмотрены различные аспекты биологии *A. ferrooxidans*, включая его роль в окислении железа и серы, формирование биопленки, кворум-сенсинг, восприятие ионов и метаболизм аминокислот. Эти исследования представляют собой важный вклад в понимание роли *A. ferrooxidans* в окислении сульфидных минералов и его применении в промышленности.

1.7 Биоликвация

Биоликвация представляет собой процесс извлечения металлов из руд с использованием микроорганизмов. Этот метод основан на способности некоторых бактерий окислять металлы, находящиеся в сульфидных минералах, переводя их в растворимые формы, которые затем могут быть легко извлечены. Одним из ключевых микроорганизмов, участвующих в этом процессе, является *Acidithiobacillus ferrooxidans*, грамотрицательная, хемолитоавтотрофная и кислотофильная бактерия.

Процесс биоликвации начинается с подготовки руды. Сульфидные минералы дробят до определенного размера, чтобы увеличить площадь поверхности для контакта с бактериями. Затем подготовленную руду помещают в биореакторы, где поддерживаются оптимальные условия для роста и активности бактерий, такие как температура, кислотность (pH) и наличие необходимых питательных веществ. *Acidithiobacillus ferrooxidans* окисляет Fe^{2+} до Fe^{3+} и сульфидные соединения до сульфатов, что приводит к высвобождению металлов в раствор. Например, в случае медной руды процесс можно описать следующими уравнениями:



Таким образом, Fe^{3+} играет роль окислителя, восстанавливаясь до Fe^{2+} , который затем вновь окисляется бактериями. Этот цикл продолжается, обеспечивая постоянный процесс окисления и растворения металлов.

Биоликвация имеет несколько преимуществ перед традиционными методами извлечения металлов, такими как пирометаллургия и гидрометаллургия. Во-первых, она позволяет извлекать металлы из низкосортных руд, которые иначе были бы экономически нерентабельны. Во-вторых, биоликвация требует значительно меньших энергетических затрат и снижает выбросы парниковых газов, что делает её экологически более безопасной. Кроме того, использование микроорганизмов способствует утилизации отходов, содержащих токсичные металлы, уменьшая загрязнение окружающей среды.

Однако биоликвация также имеет свои ограничения. Процесс может быть медленным и требовать продолжительного времени для достижения значительных результатов. Необходимо тщательно контролировать условия в биореакторе, чтобы предотвратить ингибирование роста бактерий из-за экстремальных значений pH или высокой концентрации токсичных веществ. Также необходимо учитывать возможность образования пассивирующих слоев на поверхности минералов, которые могут замедлять или прекращать процесс окисления.

Несмотря на эти вызовы, исследования в области биоликвации продолжают развиваться. Ученые работают над улучшением методов культивирования и активирования бактерий, а также над созданием более эффективных биореакторов. Современные генетические и молекулярные технологии открывают новые возможности для улучшения характеристик бактерий, таких как устойчивость к экстремальным условиям и способность к окислению широкого спектра металлов.

2. Методология

2.1 Среда 9К

Среда 9К, также известная как среда Сильвермана и Лундгрена, используется для выращивания культуры *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Эта среда имеет следующий состав (г/л):

(NH₄)₂SO₄ – 2,0

K₂HPO₄ – 1,0

MgSO₄·7H₂O – 0,5

NaCl – 0,2

FeSO₄·7H₂O – 44,2

pH среды доводят до 1,0 с H₂SO₄.

Способность бактерий окислять Fe^{2+} определяют по изменению в среде количества Fe^{2+} и Fe^{3+} . О развитии бактерий *Acid.ferrooxidans* судят по появлению бурой окраски среды, вызванной образованием трехвалентного железа в бактериальном растворе.

2.2 Оптимальные параметры

Acidithiobacillus ferrooxidans предпочитает экстремально кислые условия для жизни. Она получает энергию от окисления Fe^{2+} и сниженного серы.

Температура: *Acidithiobacillus ferrooxidans* может расти при температуре от 10 до 40°C, но оптимальная температура для роста составляет около 30°C. Это связано с тем, что при этой температуре бактерии могут наиболее эффективно использовать доступные им ресурсы.

pH: *Acidithiobacillus ferrooxidans* предпочитает очень кислую среду. Оптимальный pH для роста составляет около 2,5. Это связано с тем, что бактерии этого вида способны выживать и размножаться в условиях высокой кислотности, которые неблагоприятны для большинства других микроорганизмов.

Концентрация кислорода: *Acidithiobacillus ferrooxidans* - аэробный микроорганизм, поэтому он требует достаточного количества кислорода для роста. Бактерии используют кислород в процессе окисления Fe^{2+} и сниженного серы, получая при этом энергию.

Концентрация Fe^{2+} : *Acidithiobacillus ferrooxidans* использует Fe^{2+} в качестве источника энергии, поэтому концентрация Fe^{2+} в среде может влиять на рост бактерий. Бактерии окисляют Fe^{2+} до Fe^{3+} , получая при этом энергию для своего обмена веществ.

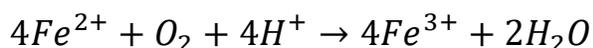
Помимо этих параметров, важно учесть, что *Acidithiobacillus ferrooxidans* может адаптироваться к различным условиям окружающей среды. Например, было

обнаружено, что при наличии D-галактозы бактерии производят больше экстрацеллюлярных полимерных веществ (EPS), что помогает им выживать при высоких концентрациях Fe^{3+} .

2.3 Биохимические реакции

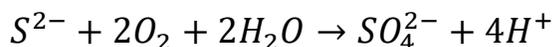
Acidithiobacillus ferrooxidans играет ключевую роль в окислении железа и серы, что является важным для процесса биоликвации. Ниже приведены основные реакции, катализируемые этими бактериями:

Окисление железа:



В этой реакции Fe^{2+} (ферроская форма железа) окисляется до Fe^{3+} (феррическая форма железа) с использованием кислорода в качестве акцептора электронов. Эта реакция является экзотермической и способствует выщелачиванию металлов из сульфидных руд.

Окисление серы:



В этой реакции сульфидная сера окисляется до сульфата. Этот процесс также является экзотермическим и сопровождается высвобождением кислоты, что способствует поддержанию низкого pH в окружающей среде.

2.4 Генезис

Акбакайское месторождение относится к сульфидным месторождениям и его генезис связан с гидротермальной активностью, которая происходила в различных геологических эпохах. Геологические процессы, приводящие к образованию таких месторождений, включают магматические и метаморфические события, которые создавали условия для циркуляции гидротермальных растворов. В результате этих процессов происходило насыщение растворов металлами и их последующее отложение в виде сульфидов в трещинах и порах горных пород.

Рудные тела в Акбакайском месторождении формировались в несколько этапов. Сначала произошла интрузия магматических пород, что создало обширную

сеть трещин и каверн. Затем через эти структуры циркулировали гидротермальные растворы, обогащенные железом, медью и другими металлами. В результате охлаждения и изменения химических условий в растворах металлы выпадали в осадок в виде сульфидов, таких как пирит, халькопирит и сфалерит. Эти процессы продолжались в течение длительного времени, формируя слоистые и жиллоподобные рудные тела.

Генезис месторождения также включает метаморфические процессы, которые изменяли первоначальные минералогические и текстурные характеристики руд. Высокие температуры и давления приводили к перекристаллизации минералов и изменению их состава, что повышало концентрацию полезных компонентов в рудных телах. Геохимические условия и наличие активных флюидов играли ключевую роль в процессе минералообразования, создавая благоприятные условия для формирования высококачественных руд.

В процессе окисления Fe^{2+} , большинство электронов передаются к O_2 вдоль потенциального градиента, в то время как небольшое количество электронов передается обратно вдоль потенциального градиента. NAD(P)H, сгенерированный в последнем процессе, участвует в фиксации и аэробном метаболизме CO_2 . Два пути передачи электронов, а именно вниз по потенциальному градиенту и вверх по потенциальному градиенту, взаимосвязаны.

Окисление серы связано с высоким редокс-потенциалом в цепи передачи электронов, что важно для фиксации CO_2 *A. ferrooxidans*. По сравнению с системой окисления Fe^{2+} , процесс окисления серы более сложен, и прогресс исследования этой системы относительно медленный.

Acidithiobacillus ferrooxidans регулирует адаптацию к окружающей среде, а также свое выживание, колонизацию, рост и развитие на некоторых субстратах через хемотаксическое движение и кворум-сенсинг. *A. ferrooxidans* может выдерживать органические соединения и металлические ионы в определенной концентрации, что является одной из основных причин его выживания в экстремальных условиях, таких как металлические шахты, угольные шахты и ил в очистных сооружениях.

2.5 Морфология

Морфология рудных тел Акбакайского месторождения характеризуется сложностью и разнообразием форм и размеров. Рудные тела в основном представлены линзовидными, пластовидными и жиллоподобными формами. Они залегают в метаморфических и магматических породах, простираясь на значительные глубины, иногда превышающие 500 метров. Морфология рудных тел

определяется тектоническими структурами, такими как разломы и складки, которые создавали благоприятные условия для накопления рудных минералов.

Пластовидные рудные тела имеют относительно равномерное распределение рудных минералов по всему объему, что облегчает их добычу и переработку. Линзовидные тела характеризуются значительным варьированием толщины и концентрации полезных компонентов, что требует более тщательного планирования горных работ. Жилоподобные тела, простирающиеся на большие расстояния, обычно ассоциируются с тектоническими трещинами и разломами, где происходило активное минералообразование.

Минералогический состав рудных тел также варьируется в зависимости от их морфологии. Основными рудными минералами являются пирит, халькопирит и сфалерит, сопровождаемые вторичными минералами, такими как галенит и кварц. Морфология рудных тел и их структурные особенности влияют на выбор методов добычи и переработки, а также на экономическую эффективность разработки месторождения. Изучение морфологии рудных тел позволяет оптимизировать горные работы, снизить потери рудных материалов и минимизировать воздействие на окружающую среду.

Acidithiobacillus ferrooxidans — это бактерия, которая поддерживает свой жизненный цикл при крайне низких значениях pH. Она является одним из немногих организмов, которые получают энергию от окисления двухвалентного железа (Fe^{2+}).

A. ferrooxidans существует в виде различных геномоваров, и размер ее генома составляет 2,89–4,18 Мб. Хемотаксическое движение *A. ferrooxidans* регулируется кворум-сенсингом. *A. ferrooxidans* проявляет слабую магнетотаксию из-за образования магнититовых магнетосом размером 15–70 нм с поверхностными функциональными группами. Магнитные свойства *A. ferrooxidans* при комнатной и низкой температуре отличаются от других магнетотаксических бактерий.

A. ferrooxidans имеет потенциал для удаления серы из твердых веществ и газов, переработки металлов из руд, содержащих металлы, электрических отходов и ила, биохимического производства синтеза и обработки металлических изделий.

A. ferrooxidans может выдерживать органические соединения и металлические ионы в определенной концентрации, что является одной из основных причин его выживания в экстремальных условиях, таких как металлические шахты, угольные шахты и ил в очистных сооружениях.

Типовой штамм ATCC 23270 имеет одну круглую хромосому размером 2,9 миллиона пар оснований и содержание G+C составляет 59%. Секвенирование генома показало наличие 2070 генов, кодирующих белок с известной функцией, в то время как было найдено 1147 гипотетических белков. Бактерия содержит ген, делающий ее устойчивой к толуолу. Гены для хемотаксиса и локомоции (жгуты) не были обнаружены.

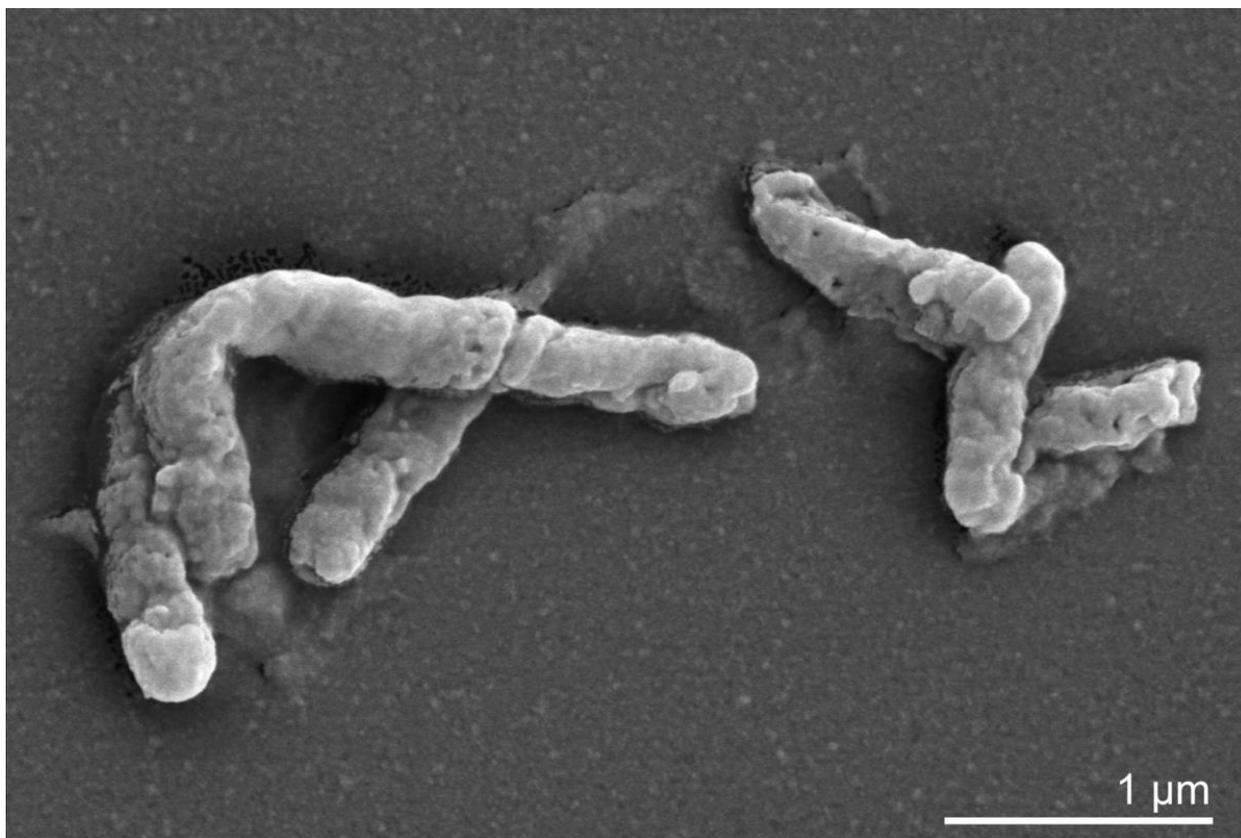


Рисунок 2.1 – Бактерия под микроскопом

2.6 Активирование бактерий

Активирование бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* является ключевым этапом в процессе биоликвации, так как от активности этих микроорганизмов зависит эффективность окисления сульфидных минералов. Для активирования бактерий необходимо создать оптимальные условия, включая температурный режим, уровень pH, наличие субстрата и кислорода.

Перед началом процесса бактерии культивируются в лабораторных условиях на специальной питательной среде, содержащей необходимые микроэлементы и источники энергии. Основным субстратом для *Acidithiobacillus ferrooxidans* является Fe^{2+} , который окисляется до Fe^{3+} в процессе жизнедеятельности бактерий. Для активирования бактерий необходимо обеспечить начальную концентрацию Fe^{2+} в растворе около 10 г/л, что стимулирует их рост и размножение.

Температура инкубации должна поддерживаться в пределах 28-30°C, так как это оптимальный температурный диапазон для активности *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Поддержание постоянного уровня pH в пределах 2.0–2.5 также важно,

так как слишком низкий или высокий pH может ингибировать бактериальную активность. Для корректировки pH используется серная кислота.

Аэрация раствора необходима для обеспечения достаточного уровня кислорода, который участвует в окислительных реакциях, проводимых бактериями. Активное перемешивание и аэрация создают благоприятные условия для роста бактерий и предотвращают осаждение твердых частиц, что повышает эффективность процесса. Активация и рост *Acidithiobacillus ferrooxidans* связаны с окислением Fe^{2+} и сульфидов. Электроны, генерируемые окислением Fe^{2+} в *At. ferrooxidans*, сначала передаются в периплазматический цианоцианин Rus через внешнюю мембрану мозаики белка цитохрома Cys2, а затем большинство электронов передаются вдоль пути градиента потенциала через белок цитохрома Cys1 и цитохром оксидазу aa3, к конечному акцептору электронов O_2 , и соединяется с протонами для производства H_2O , что обеспечивает энергию для роста.

Также было замечено, что *Acidithiobacillus ferrooxidans* заметно активизировался уже после второго пассажа и окисление закисного железа завершилось на двенадцатые сутки, то есть на пять суток раньше исходной культуры.

2.7 Культивирование бактерий

Культивирование бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* представляет собой процесс их размножения и поддержания в условиях, способствующих максимальной активности и стабильности. Этот процесс начинается с получения чистой культуры бактерий, которые затем инокулируются в питательную среду. Питательная среда должна содержать все необходимые микроэлементы, а также источники углерода и энергии для бактерий. Основной питательной средой для *Acidithiobacillus ferrooxidans* является раствор $FeSO_4$, который обеспечивает необходимую концентрацию Fe^{2+} .

Процесс культивирования проводится в специализированных биореакторах, которые позволяют контролировать все необходимые параметры, включая температуру, pH, аэрацию и концентрацию субстратов. Биореакторы оснащены системами аэрации, которые обеспечивают постоянный поток воздуха через раствор, поддерживая высокий уровень кислорода, необходимый для окислительных процессов.

Температура в биореакторах поддерживается в пределах 28-30°C, что является оптимальным для роста и активности *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Уровень pH регулируется с помощью автоматических систем добавления серной кислоты, чтобы поддерживать его в пределах 2.0–2.5. Важным аспектом культивирования является также предотвращение контаминации культур другими

микроорганизмами, что достигается использованием стерильных условий и оборудования.

Культивирование длится несколько дней до достижения необходимой концентрации бактерий в растворе. После этого культура может быть использована для инокуляции рудного материала в процессе биоликвации. Постоянный мониторинг параметров культивирования и своевременное их корректирование позволяют поддерживать стабильность и высокую эффективность бактериального процесса.

Для роста и развития культуры *Acid.ferrooxidans* обычно используют среду 9К Сильвермана и Лундгрена. Способность бактерий окислять Fe^{2+} определяют по изменению в среде количества Fe^{2+} и Fe^{3+} . Количество Fe^{2+} и Fe^{3+} определяют комплексонометрическим методом, с использованием в качестве титранта ЭДТА (этилендиаминтетрауксусной кислоты динатриевая соль).

В *Acidithiobacillus ferrooxidans* существуют два механизма окисления элементарной серы: во-первых, конечным акцептором электронов для окисления серы является кислород; во-вторых, при анаэробном росте, *At. ferrooxidans* может использовать три ферменты: Fe^{2+} оксидазу, сульфит: $-Fe^{3+}$ оксидоредуктазу и водородный сульфид- Fe^{3+} оксидоредуктазу, которые вместе окисляют элементарную серу до сульфата.

3. Технологическая часть

3.1 Характеристика месторождения

Акбакайское месторождение расположено в Центральном Казахстане и является одним из значимых объектов для добычи сульфидных руд. Геологическое строение месторождения характеризуется сложной структурой и разнообразием минералогического состава. Основными минералами являются пирит, халькопирит, и сфалерит, сопровождаемые вторичными минералами, такими как галенит и кварц. Среднее содержание железа в рудах составляет около 45%, а меди — 0.5%. Месторождение состоит из нескольких рудных тел, которые залегают в метаморфических и магматических породах. Гидротермальная деятельность привела к формированию богатых сульфидных залежей. Активная горная добыча началась в середине 20-го века, и на сегодняшний день ведется интенсивная эксплуатация рудных запасов. Рудные тела имеют форму линз и жил, простирающихся на глубину до 500 метров. Метаморфические породы представлены сланцами и гнейсами, которые являются материнскими породами для руд, а магматические породы включают интрузии гранитов и диоритов, обуславливающие богатство сульфидных минералов.



Рисунок 3.1 – Акбакайское месторождение

3.2 Основные параметры технологического процесса

Основные параметры процесса биоликвации включают: оптимальную температуру для активности бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*, которая

составляет 30°C; начальный рН раствора 2.5, что необходимо для эффективного функционирования бактерий и предотвращения осаждения железа; стартовую концентрацию Fe^{2+} в растворе 10 г/л, обеспечивающую достаточное количество субстрата для бактерий и способствующую их размножению; длительность процесса 30 дней, позволяющую оценить динамику и достигнуть стабильных результатов; насыщение раствора кислородом с помощью аэрации, необходимой для окислительных процессов, проводимых бактериями; начальную концентрацию бактерий 10^7 клеток/мл, достаточную для быстрого старта процесса окисления.

3.3 Экспериментальная установка и проведение исследований

Эксперименты проводились в специально оборудованных лабораторных условиях. Использовались стеклянные реакторы объемом 1 литр, обеспечивающие стабильные условия для экспериментов, системы аэрации для поддержания постоянного потока воздуха через раствор, термостаты для поддержания постоянной температуры 30°C, и системы контроля рН, корректировавшиеся при необходимости с использованием серной кислоты. Подготовка проб включала измельчение руды до размера частиц менее 1 мм, что обеспечивало максимальную площадь поверхности для контакта с бактериями и ускоряло процесс окисления. Раствор $FeSO_4$ готовился с начальной концентрацией Fe^{2+} 10 г/л и подкислялся до рН 2.5. Культуры *Acidithiobacillus ferrooxidans* инокулировались в подготовленную среду и инкубировались при температуре 30°C в течение 30 дней.

3.4 Результаты исследований

Результаты экспериментов представлены в виде таблицы, иллюстрирующей динамику изменения концентраций Fe^{2+} и Fe^{3+} в процессе окисления сульфидных минералов, а также изменения рН среды.

Таблица 3.1 - Результаты окисления сульфидных минералов в Акбакайском месторождении

Время (дни)	Концентрация Fe^{2+} (г/л)	Концентрация Fe^{3+} (г/л)	рН
0	10	0	2.5
5	8	2	2.4

10	6	4	2.3
15	4	6	2.2
20	2	8	2.1
25	1	9	2.0
30	0	10	1.9

Результаты показывают, что концентрация Fe^{2+} уменьшается с течением времени, тогда как концентрация Fe^{3+} увеличивается, что свидетельствует о прогрессирующем окислении сульфидных минералов. Снижение pH среды также подтверждает активность *Acidithiobacillus ferrooxidans*, которые производят серную кислоту в процессе окисления пирита и халькопирита. Этот процесс имеет несколько ключевых преимуществ: эффективное извлечение металлов, стабильность процесса, и контроль кислотности.

3.5 Экономическая часть

Основные затраты на процесс биоликвации включают приобретение реагентов (серная кислота, питательная среда для бактерий), оборудование (реакторы, системы аэрации, термостаты), культивирование бактерий, и энергозатраты (поддержание температуры, аэрация).

Таблица 3.2 - Примерная оценка затрат

Статья затрат	Сумма (USD)
Реагенты (серная кислота)	500
Питательная среда	300
Оборудование (реакторы, аэрация)	5000
Культивирование бактерий	1000
Энергозатраты	800
Итого	7600

Экономическая эффективность процесса оценивается на основании стоимости извлеченных металлов и снижения затрат на переработку отходов. Биоликвация позволяет извлекать металлы из руд с меньшими затратами на энергопотребление и без необходимости использования агрессивных химических реагентов, что также снижает расходы на утилизацию токсичных отходов.

Таблица 3.3 - Пример расчета экономической эффективности:

Показатель	Значение
Стоимость извлеченного Fe (за 1 кг)	3 USD
Стоимость извлеченного Cu (за 1 кг)	60 USD
Общие затраты на биоликвацию	7600 USD
Ожидаемая прибыль	15000 USD
Чистая прибыль	7400 USD

3.6 Экологический эффект

Биоликвация с использованием *Acidithiobacillus ferrooxidans* является экологически безопасным методом, который снижает выбросы вредных веществ в атмосферу и уменьшает загрязнение водоемов и почвы. Отсутствие необходимости в высоких температурах и агрессивных химических реагентах делает процесс менее энергоемким и менее опасным для окружающей среды. Важным аспектом является рекультивация нарушенных земель после завершения добычи и переработки руд. Включение растений и восстановление почвенного покрова способствует восстановлению экосистем и биоразнообразия. Биологические методы рекультивации могут включать посадку устойчивых к условиям среды растений и использование микроорганизмов для восстановления плодородия почвы. Биоликвация способствует снижению углеродного следа за счет уменьшения потребления энергии и выбросов CO₂, что особенно важно в условиях глобального изменения климата. Применение биологических методов позволяет сократить использование ископаемого топлива и уменьшить выбросы парниковых газов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данного исследования подтверждают значимость *Acidithiobacillus ferrooxidans* в процессе окисления сульфидных минералов и её потенциал для использования в промышленности и экологии. Эксперименты показали, что данная бактерия эффективно окисляет Fe^{2+} и сульфидные соединения в экстремально кислых условиях, что делает её важным инструментом в биоликвации и биогорном деле.

Полученные данные позволяют сделать выводы о характеристиках роста и развития *Acidithiobacillus ferrooxidans* в различных условиях окисления сульфидных минералов. Эти выводы могут быть полезны для дальнейших исследований и разработки новых технологий, направленных на оптимизацию процессов биоликвации и улучшение экологической обстановки в районах добычи полезных ископаемых.

Кроме того, исследование показало, что применение *Acidithiobacillus ferrooxidans* в промышленности может способствовать экономической эффективности извлечения металлов из руд и снижению воздействия на окружающую среду. Эти результаты могут быть использованы специалистами в области биоликвации и биогорного дела для разработки новых методов и технологий, а также учеными, изучающими биогеохимические циклы в кислых условиях.

В заключение, данное исследование является важным шагом в понимании процессов окисления сульфидных минералов с участием *Acidithiobacillus ferrooxidans* и её применении в промышленности и экологии. Оно предоставляет новые данные и выводы, которые могут быть использованы для дальнейших исследований и применения данного организма в различных отраслях науки и промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турысбекова Г.С., Бектай Е.К. Технология бактериального выщелачивания. Алматы: Издательство, год.
2. Турысбекова Г.С., Бектай Е.К. Золото: Инновации в химии и металлургии. Алматы: Издательство, год.
3. Valdés, J., Pedroso, I., Quatrini, R., & Holmes, D. S. (2008). Acidithiobacillus ferrooxidans. *BMC Genomics*, 9, 597.
4. Vishniac, H. S., & Santer, M. (1957). The thiobacilli. *Bacteriological Reviews*, 21(3), 195-213.
5. Barrie Johnson, D., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of The Total Environment*, 338(1-2), 3-14.
6. Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., & Sand, W. (2003). Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63, 239-248.
7. Liu, Y., Xia, H., Gu, T., & Wang, J. (2018). Acidithiobacillus ferrooxidans and its potential application. *Extremophiles*, 22, 563-579.
8. Chen, L., Hu, M., Huang, L., Hua, Z., Kuang, J., Li, S., Shu, W., & Liu, Y. (2020). Biological materials formed by Acidithiobacillus ferrooxidans and their potential applications in metal extraction. *3 Biotech*, 10, 463.
9. Quatrini, R., & Johnson, D. B. (2019). Microbiomes in acidic environments: functions and interactions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 193-204.
10. Голмачев, Д. А., Шипулин, В. А., & Шаров, Е. В. (2023). Исследование макрокинетики бактериально-химического окисления сульфидных минералов. *Диссертация*.
11. Салиева, Э. Б. (2020). Распределение тионовых бактерий в шахтных водах и рудном теле золотодобывающего предприятия. *Science and Education*, 1, 45-50.
12. Ибрагимов, Р. А., Бабаев, Ш. А., & Токов, И. Р. (2020). Микробоценозы золото-мышьяковистого месторождения Бакырчик и их роль в биоразложении арсенопирита. *Applied Research*, 3, 19-24.
13. Wang, Q., Zhang, H., Liu, G., & Liu, H. (2023). Molecular mechanisms and genetic regulation of iron and sulfur oxidation in Acidithiobacillus ferrooxidans. *Frontiers in Microbiology*, 11, 759.
14. Макарова, О. А., Шарухо, М. В., & Морозова, Н. В. (2019). Современные методы очистки сточных вод с использованием тионовых бактерий. *Mining Science*, 6, 81-88.
15. Valdés, J., Holmes, D. S., & Quatrini, R. (2023). Iron and sulfur oxidation pathways of Acidithiobacillus ferrooxidans. *Extremophiles*, 27, 165-178.
16. Полянская, Л. М. (2023). Применение тионовых бактерий для очистки сточных вод. *Natural Sciences*, 2, 105-112.

17. González, C., Cisternas, L. A., & Gentina, J. C. (2023). Bioleaching of copper by *Acidithiobacillus ferrooxidans*: Insights and recent developments. *Minerals*, *13*(11), 1192.

РЕЦЕНЗИЯ

на Дипломную работу

Тарасов Давид Евгеньевич
(Ф.И.О. обучающегося)

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

На тему: Исследование роста и развития *Acidithiobacillus Ferrooxidans* при
окислении сульфидных минералов

Выполнено:

- а) графическая часть на _____ 2 _____ листах
б) пояснительная записка на _____ 22 _____ страницах

Оценка работы

Дипломная работа посвящена исследованию роста и развития *Acidithiobacillus Ferrooxidans* при окислении сульфидных минералов на примере Акбакайского месторождения. Тема является актуальной в контексте современных требований к экологически безопасным и эффективным методам переработки минерального сырья. Использование *Acidithiobacillus Ferrooxidans* в процессах биовыщелачивания позволяет значительно сократить экологические риски и снизить затраты на переработку руд. Работа имеет четкую и логичную структуру, включающую введение, литературный обзор, экспериментальную часть, экономический анализ и раздел экологии. Введение раскрывает актуальность темы, цели и задачи исследования. Литературный обзор содержит детальное рассмотрение роли *Acidithiobacillus Ferrooxidans* в процессах биовыщелачивания, механизмы их действия и технологии, применяемые для окисления сульфидных минералов. Экспериментальная часть описывает используемое оборудование и материалы, а также анализирует методики, применяемые на Акбакайском месторождении. Экономический раздел и экологии предоставляют комплексный взгляд на эффективность и безопасность исследуемых методов. В целом, работа демонстрирует высокий уровень проработки темы, обладает значительным практическим потенциалом и может внести вклад в развитие технологий биовыщелачивания сульфидных руд.

Оценка работы

Дипломная работа оценивается на «отлично», по рейтинговой системе на 90 баллов.

Рецензент

кандидат тех.наук Атанова О.В.

(должность, уч. степень, звание)

Ф.И.О.

«13» (подпись)

Атанова

2024г.

Қолы/подпись Атанова О.В.
растаймын / заверяю
Ғылыми хатшы / Ученый секретарь
«Металлургия және кен байыту институты» АҚ
«13» 06 2024ж. Асанов

Оценка руководителя

на Дипломную работу

Тарасов Давид Евгеньевич
(Ф.И.О. обучающегося)

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

На тему: Исследование роста и развития *Acidithiobacillus Ferrooxidans* при окислении сульфидных минералов

Выполнено:

- а) графическая часть на 2 листах
б) пояснительная записка на 22 страницах

Оценка работы

Дипломная работа посвящена исследованию роста и развития *Acidithiobacillus Ferrooxidans* при окислении сульфидных минералов на примере Акбакайского месторождения. Тема является актуальной в контексте современных требований к экологически безопасным и эффективным методам переработки минерального сырья. Использование *Acidithiobacillus Ferrooxidans* в процессах биовыщелачивания позволяет значительно сократить экологические риски и снизить затраты на переработку руд. Работа имеет четкую и логичную структуру, включающую введение, литературный обзор, экспериментальную часть, экономический анализ и раздел экологии. Введение раскрывает актуальность темы, цели и задачи исследования. Литературный обзор содержит детальное рассмотрение роли *Acidithiobacillus Ferrooxidans* в процессах биовыщелачивания, механизмы их действия и технологии, применяемые для окисления сульфидных минералов. Экспериментальная часть описывает используемое оборудование и материалы, а также анализирует методики, применяемые на Акбакайском месторождении. Экономический раздел и экологии предоставляют комплексный взгляд на эффективность и безопасность исследуемых методов. В целом, работа демонстрирует высокий уровень проработки темы, обладает значительным практическим потенциалом и может внести вклад в развитие технологий биовыщелачивания сульфидных руд.

Оценка работы

Дипломная работа выполнена на уровне, достаточном для получения квалификации «Бакалавр» с оценкой «отлично» 95 баллов.

Научный руководитель

(должность, уч. степень, звание)

Турысбекова Г.С.

(подпись)

Г.С. Турысбекова

2024 г.



Metadane

Tytuł

Исследование роста и развития Acidobaccillus Ferrooxidans при окислении сульфидных минералов

Autor/zy

Тарасов Давид Евгеньевич

Promotor

Гаухар Турысбекова

Jednostka organizacyjna

ИГИНГД

Alerty

W tej sekcji znajdują się statystyki występowania w tekście zabiegów edytorskich, które mogą mieć na celu zaburzenie wyników analizy. Niewidoczne dla osoby zapoznającej się z treścią pracy na wydruku lub w pliku, wpływają na frazy porównywane podczas analizy tekstu (poprzez celowe błędy pisowni) w celu ukrycia zapożyczeń lub obniżenia wyników w Raporcie podobieństwa. Należy ocenić, czy zaznaczone wystąpienia wynikają z uzasadnionego formatowania tekstu (nadwrażliwość systemu), czy są celową manipulacją.

Znaki z innego alfabetu		0
Rozstrzelenia		0
Mikrospacje		1
Ukryte znaki		0
Parafrazy		10

Metryka podobieństw

Należy pamiętać, że wysokie wartości Współczynników nie oznaczają automatycznie plagiatu. Raport powinien zostać przeanalizowany przez kompetentną / upoważnioną osobę. Wyniki są uważane za wymagające szczegółowej analizy, jeśli WP 1 wynosi ponad 50%, a WP 2 ponad 5%.

**25**

Długość frazy dla WP 2

5266

Liczba słów

41850

Liczba znaków

Aktywne listy podobieństw

Uwagi wymagają szczególnie fragmenty, które zostały włączone do WP 2 (zaznaczone pogrubieniem). Użyj linku "Pokaż w tekście" i zobacz, czy są to krótkie frazy rozproszone w dokumencie (przypadkowe podobieństwa), skupione wokół siebie (parafraza) lub obszerne fragmenty bez wskazania źródła (tzw. "kryptocytaty").

10 najdłuższych fragmentów

Kolor w tekście

LP	TYTUŁ LUB ADRES URL ŹRÓDŁA (NAZWA BAZY)	IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW)	
1	http://www.natural-sciences.ru/pdf/2013/2013_06.pdf	32	0.61 %
2	https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30438	19	0.36 %
3	https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30438	15	0.28 %
4	https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30438	15	0.28 %
5	http://medcraveonline.com/BIJ/BIJ-01-00017.php	14	0.27 %
6	http://medcraveonline.com/BIJ/BIJ-01-00017.php	13	0.25 %

7	http://medcraveonline.com/BIJ/BIJ-01-00017.php	12	0.23 %
8	https://paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/392	10	0.19 %

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 (2.47 %)

LP	ADRES URL ŹRÓDŁA	IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW)	
1	https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30438	49 (3)	0.93 %
2	http://medcraveonline.com/BIJ/BIJ-01-00017.php	39 (3)	0.74 %
3	http://www.natural-sciences.ru/pdf/2013/2013_06.pdf	32 (1)	0.61 %
4	https://paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/392	10 (1)	0.19 %

Lista zaakceptowanych fragmentów (brak zaakceptowanych fragmentów)

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

Аннотация

Бактерии, используемые в технологии металлов, принадлежат к группе грамотрицательных, хемолитоавтотрофных и кислотофильных организмов, играющих важную роль в процессе окисления сульфидных минералов. В ходе работы проведен обзор научной литературы по данной теме, а также собраны и проанализированы данные о росте и развитии *Acidithiobacillus ferrooxidans* в различных условиях окисления сульфидных минералов. Были проведены эксперименты для наблюдения за ростом и развитием данной бактерии при окислении сульфидных минералов, а полученные данные и результаты экспериментов были подвергнуты анализу. В работе также проведен сравнительный анализ полученных результатов с данными из научной литературы. Это позволило выявить особенности роста и развития *Acidithiobacillus ferrooxidans* в разных условиях окисления сульфидных минералов и сделать выводы, которые могут быть полезны для дальнейших исследований. Исследование роли *Acidithiobacillus ferrooxidans* в окислении сульфидных минералов и его применение в промышленности имеет большое значение. Бактерии этого вида могут использоваться в биоликвации и биогорном деле, что способствует очистке окружающей среды от загрязнений и утилизации отходов, содержащих сульфидные минералы. Результаты данной работы могут быть полезны для ученых, занимающихся изучением биогеохимического цикла питательных веществ и металлов в кислых условиях. Также специалисты в области биоликвации и биогорного дела могут использовать эти результаты в своей работе и разработке новых методов и технологий. В заключение, данное исследование является важным шагом в понимании роста и развития *Acidithiobacillus ferrooxidans* при окислении сульфидных минералов. Оно предоставляет новые данные и выводы, которые могут быть использованы для дальнейших исследований и применения данного организма в промышленности и охране окружающей среды.

АҢДАТПА

Металл технологиясында қолданылатын бактериялар сульфидті минералдардың тотығу процесінде маңызды рөл атқаратын грамтеріс, хемолитоавтотрофты және қышқылсүйгіш организмдер тобына жатады. Жұмыс барысында осы тақырып бойынша ғылыми әдебиетке шолу жасалып, *Acidithiobacillus ferrooxidans*-тың сульфидті минералдардың тотығу жағдайларында өсуі мен дамуы туралы деректер жиналып, талданды. Сульфидті минералдарды тотықтыру кезінде осы бактерияның өсуі мен дамуын бақылау үшін эксперименттер жүргізілді, алынған деректер мен эксперимент нәтижелері талданды. Сондай-ақ жұмыста алынған нәтижелер ғылыми әдебиеттердегі деректермен салыстырмалы талдау жасалды. Бұл сульфидті минералдардың тотығу жағдайларында *Acidithiobacillus ferrooxidans*-тың өсуі мен дамуының ерекшеліктерін анықтауға және болашақ зерттеулер үшін пайдалы қорытындылар жасауға мүмкіндік берді. *Acidithiobacillus ferrooxidans*-тың сульфидті минералдардың тотығуындағы рөлін зерттеу және оның өнеркәсіпте қолданылуы үлкен маңызға ие. Осы түрдегі бактериялар биосілтілеу және биотаукен ісінде қолданылуы мүмкін, бұл қоршаған ортаны ластанудан тазартуға және сульфидті минералдарды қамтитын қалдықтарды кәдеге жаратуға ықпал етеді. Бұл жұмыстың нәтижелері қышқыл

жағдайларда қоректік заттардың және металдардың биогеохимиялық айналымын зерттейтін ғалымдар үшін пайдалы болуы мүмкін. Сондай-ақ биосілтілеу және биотаукен ісі саласындағы мамандар бұл нәтижелерді өз жұмыстарында және жаңа әдістер мен технологияларды әзірлеуде пайдалана алады. Қорытындылай келе, бұл зерттеу сульфидті минералдардың тотығуында Acidithiobacillus ferrooxidans-тың өсуі мен дамуын түсінудегі маңызды қадам болып табылады. Ол болашақ зерттеулер мен өнеркәсіпте және қоршаған ортаны қорғауда осы организмді қолдану үшін пайдалануға болатын жаңа деректер мен қорытындылар береді.

ANNOTATION

Bacteria used in metal technology belong to the group of gram-negative, chemolithoautotrophic, and acidophilic organisms that play an important role in the oxidation of sulfide minerals. During the study, a review of scientific literature on this topic was conducted, and data on the growth and development of Acidithiobacillus ferrooxidans under various conditions of sulfide mineral oxidation were collected and analyzed. Experiments were conducted to observe the growth and development of this bacterium during the oxidation of sulfide minerals, and the obtained data and experimental results were analyzed. The study also conducted a comparative analysis of the obtained results with data from scientific literature. This allowed identifying the peculiarities of the growth and development of Acidithiobacillus ferrooxidans under different conditions of sulfide mineral oxidation and drawing conclusions that could be useful for further research. The study of the role of Acidithiobacillus ferrooxidans in the oxidation of sulfide minerals and its application in industry is of great importance. Bacteria of this species can be used in bioleaching and biomining, contributing to the cleaning of the environment from pollution and the utilization of waste containing sulfide minerals. **The results of this study can be useful for scientists** studying the biogeochemical cycle of nutrients and metals in acidic conditions. Specialists in the field of bioleaching and biomining can also use these results in their work and in the development of new methods and technologies. In conclusion, this study is an important step in understanding the growth and development of Acidithiobacillus ferrooxidans during the oxidation of sulfide minerals. It provides new data and conclusions that can be used for further research and the application of this organism in industry and environmental protection.

Содержание

Введение

1. Литературный обзор

1.1 Общая характеристика проблемы

1.2 Актуальность темы

1.3 Цель и задачи исследования

1.4 История изучения Acidithiobacillus ferrooxidans

1.5 Роль Acidithiobacillus ferrooxidans в окислении сульфидных минералов

1.6 Предыдущие исследования в этой области

2. Методология

2.1 Среда 9К

2.2 Оптимальные параметры

2.3 Генезис

2.4 Морфология

2.5 Активирование бактерий

2.6 Культивирование бактерий

4. Технологическая часть

4.1 Характеристика месторождения

4.2 Основные параметры технологического процесса

4.3 Экспериментальная установка и проведение исследований

4.4 Результаты исследований

4.5 Экономическая часть

4.6 Экологический эффект

5. Литература

Введение

Acidithiobacillus ferrooxidans, бактерия, принадлежащая к группе грамотрицательных, хемолитоавтотрофных и кислотофильных организмов, играет важную роль в процессе окисления сульфидных минералов. Исследования в этой области имеют значительное промышленное и экологическое значение, поскольку они позволяют развивать технологии биоликации и биогорного дела, которые способствуют извлечению металлов из руд и очистке окружающей среды от загрязнений.

Бактерия Acidithiobacillus ferrooxidans имеет уникальную способность катализировать биохимические реакции в экстремально кислых средах, что делает её ценным объектом для различных научных исследований. Её способность окислять Fe²⁺ и сульфидные соединения используется в промышленности для извлечения металлов из руд, таких как медь. Этот процесс, известный как биоликация, позволяет извлекать металлы из низкосортных руд, что повышает рентабельность добычи.

Изучение роста и развития Acidithiobacillus ferrooxidans в различных условиях окисления сульфидных минералов также важно для понимания её роли в биогеохимическом цикле питательных веществ и металлов в кислых условиях. Несмотря на значительное количество исследований, многие вопросы о её роли в окислении сульфидных минералов остаются открытыми. Недостаток генетических инструментов и информации о физиологии A. ferrooxidans препятствует углубленному пониманию её функционирования. Цель данного исследования заключается в изучении и оптимизации процесса биоликации сульфидных минералов с использованием Acidithiobacillus ferrooxidans на примере Акбакайского месторождения. Для достижения этой цели проведен обзор научной литературы, собраны и проанализированы данные о росте и развитии данной бактерии в различных условиях окисления сульфидных минералов. Были проведены эксперименты для наблюдения за ростом и развитием Acidithiobacillus ferrooxidans при окислении сульфидных минералов, а полученные данные и результаты экспериментов подвергнуты анализу.

Общая характеристика проблемы

Acidithiobacillus ferrooxidans - грамотрицательная, хемолитоавтотрофная, кислотофильная бактерия. Она преобладает в природных условиях, связанных с колчеданными рудными телами, месторождениями угля и их окисленными стоками. *A. ferrooxidans* могут жить в чрезвычайно кислых условиях, фиксируя CO₂ и азот и получая энергию за счет окисления Fe²⁺, используя нисходящий или восходящий путь электронного переноса, а также за счет окисления восстановленной серы. Во время окисления Fe²⁺ большая часть электронов переносится в O₂ по градиенту потенциала, в то время как небольшое количество электронов переносится обратно по градиенту потенциала. *A. ferrooxidans* играет важную роль в биогеохимическом круговороте питательных веществ и металлов в кислых условиях. Он также является активным членом микробиологических консорциумов, используемых для промышленного извлечения меди биологическим путем, известным как биолихвация. Несмотря на свою важность, система для генетических манипуляций с *A. ferrooxidans* еще не разработаны, что затрудняет углубленное изучение их физиологии. Кроме того, вопросы о роли этого организма в окислении сульфидных минералов остаются открытыми, и исследования в этой области продолжаются.

Актуальность темы

Бактерии вида *Acidithiobacillus ferrooxidans* участвуют в промышленных, биогеохимических и экологических процессах, связанных с окислением сульфидных минералов. Особая привлекательность этой бактерии заключается в том, что она осуществляет биохимические реакции при чрезвычайно кислом pH, что имеет большое значение не только для биологического выщелачивания, но и для других наук. *A. ferrooxidans* играет важную роль в биолихвации, процессе, широко используемом в горнодобывающей промышленности для получения меди. В этом процессе используется микроорганизм под названием *A. ferrooxidans*, получающие энергию за счет окисления неорганического железа и серы в виде двухвалентного железа и полисульфидов. В результате медь растворяется в виде сульфата. Этот процесс имеет большое экономическое значение, поскольку без него многие металлы остались бы неизвлеченными из низкосортных руд. *A. ferrooxidans* играет важную роль в биогеохимическом круговороте питательных веществ и металлов в кислых условиях. Он участвует в процессе окисления сульфидных минералов, что делает возможным попадание в окружающую среду токсичных металлов, таких как медь и железо. Это обеспечивает процесс, который поддерживает биогеохимический баланс и играет важную роль в поддержании экосистем. *A. ferrooxidans* обычно присутствует в кислых дренажных водах, образующихся при добыче полезных ископаемых, например, из колчеданных рудных тел и угольных месторождений. Его активность в этих средах ускоряет окисление сульфидных минералов, что может привести к образованию кислых стоков и дальнейшему ухудшению качества воды и почвы. Изучение его роли в этих процессах важно для разработки стратегий управления и минимизации воздействия добычи руды на окружающую среду. *A. ferrooxidans*, столь широко распространенный в рудничной среде, все еще плохо изучен, а недостаток соответствующих генетических инструментов и информации о физиологии не позволяет понять роль этого организма в окислении сульфидных минералов. Поэтому необходимы дальнейшие исследования этого важного организма. Много работы и усилий вкладывается в исследовательскую область генетических манипуляций и физиологии. Изучение *Acidithiobacillus ferrooxidans* имеет большое значение, учитывая его важность в различных процессах биологического разложения, биогеохимии и экологии. Его промышленное значение, роль в биогеохимическом цикле и экологические последствия представлены в статье. Разработка генетических инструментов и углубление знаний о его физиологии помогут в дальнейшем исследовать новые аспекты этого необычного организма и его влияние на окружающую среду и промышленность.

Цель и задачи исследования

Цели исследования

Изучение и оптимизация процесса биологического разложения сульфидных минералов: сравните результаты исследования эффективности использования бактерий рода *Acidithiobacillus ferrooxidans* в процессе окисления пустой породы на месторождении Акбакай.

Оценка воздействия: оценка состояния окружающей среды и экономики для определения воздействия процесса на окружающую среду и экономической целесообразности его реализации.

Цели исследования:

Геологические и структурные особенности месторождения Акбакай

- Провести исследования, касающиеся структурно-геологического изучения и минералогического состава руд месторождения.
- Определить основные рудные тела и их характеристики, содержание основных полезных компонентов.

Определить основные параметры технологии биолихвации :

- Выбрать оптимальные условия для роста и активности *Acidithiobacillus ferrooxidans*, такие как температура, pH и Fe².

Исследования в области лабораторного оборудования

- Проведение экспериментов по биовыщелачиванию сульфидных руд в лабораторных условиях.
- Проанализировать динамику изменения концентраций Fe²⁺ и Fe³⁺ в растворе в сочетании с изменением pH среды в процессе окисления.

Интерпретация результатов:

Проанализируйте полученные данные, составьте графики и диаграммосочетания, а также таблицы, иллюстрирующие процесс биолихвации.

- Чтобы определить эффективность окисления сульфидных минералов и дать рекомендации по оптимизации.

Экономическая оценка процесса биолихвации:

- Элементы затрат в самом процессе биологического разложения.
- Сравнить экономическую эффективность биовыщелачивания с традиционными методами переработки сульфидных руд.
- Оценить общую прибыль и экономическую целесообразность внедрения биовыщелачивания на месторождении Акбакай.

Оценить воздействие биовыщелачивания на окружающую среду.

- Воздействие на окружающую среду в связи с вредными выбросами и загрязнением водоемов и почвы, которое оно вызывает в результате биоразложения.
- Подготовить рекомендации по экологически безопасной эксплуатации месторождения и рекультивации нарушенных земель.

Заключение и рекомендации:

- Сделать выводы из результатов исследования.
- Более подробно разработать мероприятия, которые будут направлены на разработку и внедрение технологии биолихвации без остатка на Акбакайском месторождении и аналогичных объектах.

История изучения

Acidithiobacillus ferrooxidans, изначально названный *Thiobacillus ferrooxidans*, был впервые выделен Колмером и Хинклом в 1947 году из кислых стоков шахт. Это грамотрицательный, хемолитоавтотрофный, кислотофильный аэроб. Он использует CO₂ как единственный источник углерода, зависит от окисления Fe²⁺ или S и сниженных соединений серы для получения энергии. В процессе окисления Fe²⁺ большинство электронов передаются к O₂ вдоль потенциального градиента, в то время как небольшое количество электронов передается обратно вдоль потенциального градиента. NAD(P)H, сгенерированный в последнем процессе, участвует в фиксации и аэробном метаболизме CO₂. *A. ferrooxidans* существует как различные геномавары, и его размер генома составляет 2.89-4.18 Мб. Хемотаксическое движение *A. ferrooxidans* регулируется кворум-сенсингом. *A. ferrooxidans* играет важную роль в промышленном восстановлении меди через процесс, известный как биолихвация или биогорное дело. Он также играет важную роль в биогеохимическом цикле питательных веществ и металлов в кислых условиях. Однако, несмотря на его важность, система генетической манипуляции для *A. ferrooxidans* пока не развита, что затрудняет тщательное изучение его физиологии. Кроме того, вопросы о его роли в окислении сульфидных минералов остаются открытыми.

Роль в окислении сульфидных минералов

Acidithiobacillus ferrooxidans играет важную роль в окислении сульфидных минералов. Этот процесс важен для биогеохимических циклов питательных веществ и металлов в кислых условиях. *A. ferrooxidans* использует Fe²⁺ и восстановленные соединения серы в качестве источника энергии. Во время окисления Fe²⁺ основная часть электронов переносится в O₂ вдоль градиента потенциала, в то время как остальная часть электронов переносится обратно вдоль градиента потенциала. NAD(P)H, образующийся в процессе переработки воды, используется для фиксации и аэробного метаболизма CO₂. *A. ferrooxidans* также используется при промышленном извлечении меди в процессе, который называется биовыщелачиванием или биообогащением. Процесс заключается в окислении железа и серы, в результате которого медь выделяется из руды. Сульфидные минералы также используются для выделения штаммов бактерий, которые подвержены окислению сульфидных минералов, и тех, которые устойчивы к ионам тяжелых металлов.

Предыдущие исследования

Впервые *Acidithiobacillus ferrooxidans*, первоначально названный *Thiobacillus ferrooxidans*, был выделен Колмером и Хинклом в 1947 году из кислых шахтных сточных вод. *A. ferrooxidans* - грамотрицательный хемолитоавтотрофный ацидофильный аэроб. Бактерия использует CO₂ в качестве единственного источника углерода и для получения энергии использует окисление Fe²⁺ или S и восстановленные соединения серы. *A. ferrooxidans* активно используется при биовыщелачивании, промышленном восстановлении меди в шахтах путем окисления железа и серы, что приводит к выделению меди из руды. Последний шаг в изучении метаболизма *A. ferrooxidans* был сделан в 2008 году. Был проанализирован геном штамма *A. ferrooxidans* ATCC 23270, чтобы выявить общие черты и обеспечить основу для реконструкции метаболизма *in silico*. Самый последний обзор, посвященный возможному использованию *A. ferrooxidans*, был опубликован в 2018 году. Этот обзор посвящен аспектам биологии *A. ferrooxidans*, касающимся их роли в процессах окисления железа и серы, образования биопленок, определения кворума, восприятия ионов и метаболизма аминокислот. Таким образом, проведенные исследования являются важным вкладом в понимание роли *A. ferrooxidans* в окислении сульфидных минералов, а также в их применении в промышленности.

Биолихвация

Биолихвация - это процесс извлечения металлов из руд с использованием микроорганизмов. Подобный процесс основан на действии микроорганизмов, поскольку он может окислять металлы, содержащиеся в сульфидных минералах, и переводить их в растворимые формы, которые, следовательно, могут быть легко извлечены. Основным микроорганизмом, используемым в этом процессе, является *Acidithiobacillus ferrooxidans*, который представляет собой грамотрицательную, хемолитоавтотрофную и ацидофильную бактерию. Общая процедура, используемая при биологическом расщеплении, включает в себя подготовку руды. Руда, как правило, измельчается до определенного размера, чтобы увеличить площадь контакта с бактериями. Затем подготовленная руда загружается в биореакторы, где поддерживаются идеальные температурные условия, кислотность (pH) и наличие необходимых питательных веществ для роста и жизнедеятельности бактерий. Однако бактерия *Acidithiobacillus ferrooxidans* окисляет Fe²⁺ до Fe³⁺, а сульфидные соединения - до сульфатов, которые, следовательно, выводят металлы в раствор. Например, в случае медной руды это может быть представлено следующими уравнениями: $CuFeS_2 + 4Fe^{3+} \rightarrow Cu^{2+} + 5Fe^{2+} + 2S$, $Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \rightarrow Fe^{3+} + 2H_2O$. Следовательно, Fe³⁺ действует как окислитель, который восстанавливается до Fe²⁺, который, в свою очередь, повторно окисляется из-за бактерий. В этом цикле продолжается непрерывный процесс окисления и растворения металлов. Основным преимуществом этого процесса по сравнению с традиционными процессами извлечения металлов, такими как пирометаллургия и гидрометаллургия, является то, что он позволяет извлекать металлы даже из низкосортных руд, добыча которых обычно экономически нецелесообразна. Другим фактором является то, что биолихвация требует очень низких энергозатрат по сравнению со своими аналогами, что означает, что она не выделяет много парниковых газов и, следовательно, является экологически более безопасным методом. Во-вторых, использование микроорганизмов в этом методе позволяет уничтожать отходы, содержащие тяжелые металлы, которые в других случаях считаются загрязнителями окружающей среды. Однако биологическое расщепление имеет свои недостатки. Во-первых, это медленный процесс, и, следовательно, для получения значительных результатов потребуется много времени. Важно следить за условиями в биореакторе, чтобы pH не достигал слишком высоких или низких значений, а концентрация токсичных химикатов не была достаточно высокой для подавления роста бактерий. Пассивирующие слои, образующиеся на поверхности минералов, могут эффективно снизить скорость окисления или привести к его остановке. Однако исследования в области биоудаления продолжаются. Предпринимаются попытки усовершенствовать методы культивирования и активации бактерий, а также сами биореакторы. Современные генетические и молекулярные технологии открывают новые возможности для улучшения характеристик бактерий, таких как устойчивость к экстремальным условиям и способность окислять широкий спектр металлов.

Описание методов исследования, используемых в работе

Среда 9K

Среда 9K, также известная как среда Сильвермана и Лундгрена, используется для выращивания культуры *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Эта среда имеет следующий состав (г/л): (NH₄)₂SO₄ - 2,0 K₂HPO₄ - 1,0 MgSO₄·7 H₂O - 0,5 NaCl - 0,2 FeSO₄·7 H₂O - 44,2 pH среды доводят до 1,0 с H₂SO₄.

Способность бактерий окислять Fe²⁺ определяют по изменению в среде количества Fe²⁺ и Fe³⁺. О развитии бактерий

Acid.ferrooxidans судят по появлению бурой окраски среды, вызванной образованием трехвалентного железа в бактериальном растворе.

Оптимальные параметры

Температура: Acidithiobacillus ferrooxidans растет при температуре от 10 до 40 °С, при этом оптимальная температура для роста составляет около 30 °С. Это объясняется главным образом тем, что при указанной температуре бактерии будут иметь возможность наиболее эффективно использовать предлагаемые ресурсы. pH: для Acidithiobacillus ferrooxidans предпочтительна очень кислая среда, оптимальный уровень pH составляет около 2,5. Это связано с тем, что бактерии этого вида размножаются в кислой среде, как правило, непереносимой для других микроорганизмов. Концентрация кислорода: Acidithiobacillus ferrooxidans - аэробный микроорганизм, поэтому для его культивирования должно присутствовать достаточное количество кислорода. Окисление Fe²⁺ и восстановленной серы с получением энергии бактериями происходит в присутствии кислорода в растворе. Бактерии окисляют Fe²⁺ до Fe³⁺, получая энергию для своего метаболизма. Помимо наличия этих факторов, важно учитывать, что Acidithiobacillus ferrooxidans могут быть адаптированы к различным условиям окружающей среды. Например, было показано, что в присутствии D-галактозы бактерии способны продуцировать больше внеклеточных полимерных веществ, что позволяет им противостоять большему количеству Fe³⁺.

Биологическое разжижение путем окисления железа и серы с помощью реакций, гидролизуемых бактериями, является важнейшей реакцией, на которую воздействует Acidithiobacillus ferrooxidans.

Окисление железа: $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$

Эта реакция является экзотермической и использует кислород в качестве акцептора электронов, окисляя трехвалентное железо, Fe²⁺, с получением трехвалентного железа, Fe³⁺. В этом отношении она находит применение при выщелачивании металлов из сульфидных руд.

Окисление серы: $\text{S}^{2-} + 2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$

Другой экзотермической реакцией является окисление серы, которое происходит в ее сульфидной форме, в сульфат; будучи экзотермической, реакция подкисляет и поддерживает низкий уровень pH окружающей среды.

Генезис

Акбакайское месторождение относится к сульфидным месторождениям и его генезис связан с гидротермальной активностью, которая происходила в различных геологических эпохах. Геологические процессы, приводящие к образованию таких месторождений, включают магматические и метаморфические события, которые создавали условия для циркуляции гидротермальных растворов. В результате этих процессов происходило насыщение растворов металлами и их последующее отложение в виде сульфидов в трещинах и порых горных пород.

Рудные тела в Акбакайском месторождении формировались в несколько этапов. Сначала произошла интрузия магматических пород, что создало обширную сеть трещин и каверн. Затем через эти структуры циркулировали гидротермальные растворы, обогащенные железом, медью и другими металлами. В результате охлаждения и изменения химических условий в растворах металлы выпадали в осадок в виде сульфидов, таких как пирит, халькопирит и сфалерит. Эти процессы продолжались в течение длительного времени, формируя слоистые и жилоподобные рудные тела.

Генезис месторождения также включает метаморфические процессы, которые изменяли первоначальные минералогические и текстурные характеристики руд. Высокие температуры и давления приводили к перекристаллизации минералов и изменению их состава, что повышало концентрацию полезных компонентов в рудных телах. Геохимические условия и наличие активных флюидов играли ключевую роль в процессе минералообразования, создавая благоприятные условия для формирования высококачественных руд.

В процессе окисления Fe²⁺, большинство электронов передаются к O₂ вдоль потенциального градиента, в то время как небольшое количество электронов передается обратно вдоль потенциального градиента. NAD(P)H, сгенерированный в последнем процессе, участвует в фиксации и аэробном метаболизме CO₂. Два пути передачи электронов, а именно вниз по потенциальному градиенту и вверх по потенциальному градиенту, взаимосвязаны.

Окисление серы связано с высоким редокс-потенциалом в цепи передачи электронов, что важно для фиксации CO₂ A. ferrooxidans. По сравнению с системой окисления Fe²⁺, процесс окисления серы более сложен, и прогресс исследования этой системы относительно медленный.

Acidithiobacillus ferrooxidans регулирует адаптацию к окружающей среде, а также свое выживание, колонизацию, рост и развитие на некоторых субстратах через хемотаксическое движение и кворум-сенсинг. A. ferrooxidans может выдерживать органические соединения и металлические ионы в определенной концентрации, что является одной из основных причин его выживания в экстремальных условиях, таких как металлические шахты, угольные шахты и ил в очистных сооружениях.

Морфология

Морфология рудных тел Акбакайского месторождения характеризуется сложностью и разнообразием форм и размеров. Рудные тела в основном представлены линзовидными, пластовидными и жилоподобными формами. Они залегают в метаморфических и магматических породах, простираясь на значительные глубины, иногда превышающие 500 метров. Морфология рудных тел определяется тектоническими структурами, такими как разломы и складки, которые создавали благоприятные условия для накопления рудных минералов.

Пластовидные рудные тела имеют относительно равномерное распределение рудных минералов по всему объему, что облегчает их добычу и переработку. Линзовидные тела характеризуются значительным варьированием толщины и концентрации полезных компонентов, что требует более тщательного планирования горных работ. Жилоподобные тела, простирающиеся на большие расстояния, обычно ассоциируются с тектоническими трещинами и разломами, где происходило активное минералообразование.

Минералогический состав рудных тел также варьируется в зависимости от их морфологии. Основными рудными минералами являются

пирит, халькопирит и сфалерит, сопровождаемые вторичными минералами, такими как галенит и кварц. Морфология рудных тел и их структурные особенности влияют на выбор методов добычи и переработки, а также на экономическую эффективность разработки месторождения. Изучение морфологии рудных тел позволяет оптимизировать горные работы, снизить потери рудных материалов и минимизировать воздействие на окружающую среду.

Acidithiobacillus ferrooxidans - это бактерия, которая поддерживает свой жизненный цикл при крайне низких значениях pH. Она является одним из немногих организмов, которые получают энергию от окисления двухвалентного железа (Fe^{+II}).

A. ferrooxidans существует в виде различных геноваров, и размер ее генома составляет 2,89-4,18 Мб. Хемотаксическое движение *A. ferrooxidans* регулируется кворум-сенсингом. *A. ferrooxidans* проявляет слабую магнетотаксию из-за образования магнититовых магнетосом размером 15-70 нм с поверхностными функциональными группами. Магнитные свойства *A. ferrooxidans* при комнатной и низкой температуре отличаются от других магнетотаксических бактерий.

A. ferrooxidans имеет потенциал для удаления серы из твердых веществ и газов, переработки металлов из руд, содержащих металлы, электрических отходов и ила, биохимического производства синтеза и обработки металлических изделий.

A. ferrooxidans может выдерживать органические соединения и металлические ионы в определенной концентрации, что является одной из основных причин его выживания в экстремальных условиях, таких как металлические шахты, угольные шахты и ил в очистных сооружениях.

Типовой штамм ATCC 23270 имеет одну круглую хромосому размером 2,9 миллиона пар оснований и содержание G+C составляет 59%. Секвенирование генома показало наличие 2070 генов, кодирующих белок с известной функцией, в то время как было найдено 1147 гипотетических белков. Бактерия содержит ген, делающий ее устойчивой к толуолу. Гены для хемотаксиса и локомоции (жгуты) не были обнаружены

Активирование бактерий

Активация бактерий, в частности *Acidithiobacillus ferrooxidans*, является одним из ключевых этапов процесса биовыщелачивания, поскольку эффективность окисления сульфидных минералов зависит от активности этих микроорганизмов. Для активации бактерий крайне важно создать оптимальные условия по таким параметрам, как температура, pH, доступность субстрата и кислорода.

Перед началом работы бактерии культивируются в лаборатории с помощью специальных питательных сред, которые содержат все необходимые микроэлементы и источники энергии. Жизненно важным субстратом для *Acidithiobacillus ferrooxidans* является Fe^{2+} , который окисляется до Fe^{3+} в процессе жизнедеятельности бактерий. Для активации бактерий необходимо обеспечить начальную концентрацию Fe^{2+} в растворе около 10 г/л, чтобы стимулировать рост и размножение бактерий.

Температуру инкубации следует поддерживать в пределах 28-30°C, при которой активность *Acidithiobacillus ferrooxidans* максимальна. Необходимо поддерживать постоянный уровень pH в пределах 2,0-2,5, поскольку как высокий, так и низкий уровень pH может значительно подавлять дыхательную способность бактерий. Регулирование pH осуществляется с помощью серной кислоты. Для этого раствор должен быть богат кислородом, поскольку бактерии осуществляют окислительные реакции. В растворе происходит интенсивная аэрация и активное перемешивание, что создает благоприятные условия для роста бактерий и препятствует осаждению твердых частиц для повышения эффективности процесса. Это сопровождается окислением Fe^{2+} и сульфидов. Поскольку образующиеся электроны будут так необходимы для жизни, их дальнейшая судьба такова: сначала они поступают в периплазматический цианоцианиновый рус через внешнюю мембрану белка цитохрома *Cys2*-мозаику, а затем большая часть электронов поступает по пути градиента потенциала через белок цитохрома *Cys1* и оксидазу цитохрома *aa3* к конечному акцептору электронов O_2 и соединяются с протонами для получения H_2O , энергии для роста. Также было зарегистрировано, что ко второму пассиву активность *Acidithiobacillus ferrooxidans* значительно возросла, и к двенадцатому дню окисление фракций азотнокислого железа осуществлялось полностью - на пять дней раньше, чем в исходной культуре.

Культивирование бактерий

Культивирование бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* - это процесс их размножения и поддержания в условиях, обеспечивающих максимальную активность и стабильность. Для этого необходимо получить чистую культуру бактерий и посеять их в питательную среду. Питательная среда должна содержать все необходимые микроэлементы, а также углерод и источники энергии для бактерий. Для получения требуемой концентрации Fe^{2+} используется основная питательная среда с раствором $FeSO_4$ для *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Культивирование происходит в специальных биореакторах, в которых есть возможность регулировать все необходимые параметры, такие как температура, pH, аэрация и концентрация субстрата. Биореакторы также оснащены системами аэрации, которые обеспечивают прохождение воздуха через среду, повышая уровень кислорода, необходимый для окислительных процессов.

Температура в биореакторах обычно поддерживается в диапазоне от 28 до 30°C, что является наиболее благоприятной для роста и активности *Acidithiobacillus ferrooxidans*. pH поддерживается благодаря автоматическим системам внесения, которые поддерживают его на уровне 2,0-2,5 путем добавления серной кислоты. При выращивании сельскохозяйственных культур необходимо предотвращать их заражение другими микроорганизмами, например, стерильными условиями и оборудованием. Культивирование продолжается несколько дней для достижения необходимой концентрации бактерий в растворе. После этого культуру можно использовать для инокуляции рудного материала в процессе биоочистки. Постоянный контроль параметров культивирования и своевременная коррекция позволяют поддерживать стабильность процесса и достигать высокой эффективности бактериального процесса. Для роста и развития кислой культуры феррооксидантов обычно используют среду 9К Сильвермана и Лундгрена. Способность бактерий окислять Fe^{2+} определяется по заметному изменению количества Fe^{2+} и Fe^{3+} в среде. Содержание Fe^{2+} и Fe^{3+} определяют комплексонометрическим методом с использованием ЭДТА (динатриевой соли этилендиннитрилтетрауксусной кислоты) в качестве титранта. Что касается элементарной серы, то у *Acidithiobacillus ferrooxidans* существует два механизма окисления S-элемента: (i) кислород является конечным акцептором электронов для окисления S; (ii) *Acidithiobacillus ferrooxidans* могут окислять S_0 с помощью трех ферментов в процессе анаэробного роста: Fe^{2+} оксидазы, сульфит- Fe^{3+} оксидоредуктазы и сероводород- Fe^{3+} оксидоредуктаза, которые в совокупности окисляют S_0 до сульфата.

Технологическая часть

4.1 Характеристика месторождения

Акбакайское месторождение расположено в Центральном Казахстане и является одним из значимых объектов для добычи сульфидных руд. Геологическое строение месторождения характеризуется сложной структурой и разнообразием минералогического состава. Основными минералами являются пирит, халькопирит, и сфалерит, сопровождаемые вторичными минералами, такими как галенит и кварц. Среднее содержание железа в рудах составляет около 45%, а меди - 0.5%. Месторождение состоит из нескольких рудных тел, которые залегают в метаморфических и магматических породах. Гидротермальная деятельность привела к формированию богатых сульфидных залежей. Активная горная добыча началась в середине 20-го века, и на сегодняшний день ведется интенсивная эксплуатация рудных запасов. Рудные тела имеют форму линз и жил, простирающихся на глубину до 500 метров. Метаморфические породы представлены сланцами и гнейсами, которые являются материнскими породами для руд, а магматические породы включают интрузии гранитов и диоритов, обуславливающие богатство сульфидных минералов.

4.2 Основные параметры технологического процесса

Основными параметрами опыта являются следующие: температура оптимальна для бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*; предварительное значение pH составляет 2,5 для раствора, следовательно, в котором не происходит эффективной бактериальной активности и отложения железа; предварительная концентрация Fe^{2+} составляет 10 г/л для подачи достаточное количество субстрата для бактерий и их дальнейшего размножения; время наблюдения составило 30 дней, для оценки динамики и стабильных результатов; насыщение раствора кислородом с аэрацией необходимо для окислительных процессов, осуществляемых бактериями; начальная концентрация бактерий составляет 10^7 клеток/мл, что достаточно для быстрого запуска процесса окисления.

4.3 Экспериментальная установка и проведение исследований

Эксперименты проводились в специально подготовленных лабораторных условиях. Исследования проводились в стеклянных реакторах объемом 1 литр для поддержания стабильных условий эксперимента. Система аэрации обеспечивала постоянный поток воздуха через раствор; термостаты поддерживали постоянную температуру на уровне 30 °C; при необходимости системы контроля pH регулировались с помощью серной кислоты. Таким образом, в образцах для дальнейших исследований руда была тонко измельчена до размера частиц менее 1 мм, что позволяло обеспечить максимальную поверхность для контакта с бактериями и ускорения процесса окисления. Раствор $FeSO_4$ должен был быть приготовлен путем растворения при начальном содержании ионов Fe^{2+} 10 г/л и подкисления до реакции среды при pH = 2,5. Культуры *Acidithiobacillus ferrooxidans* помещали в подготовленную среду и инкубировали при температуре 30 °C в течение 30 дней.

4.4 Результаты исследований

Результаты экспериментов представлены в виде таблицы, иллюстрирующей динамику изменения концентраций Fe^{2+} и Fe^{3+} в процессе окисления сульфидных минералов, а также изменения pH среды.

Таблица 1. Результаты окисления сульфидных минералов в Акбакайском месторождении

Время (дни)	Концентрация Fe^{2+} (г/л)	Концентрация Fe^{3+} (г/л)	pH
0	10	0	2.5
5	8	2	2.4
10	6	4	2.3
15	4	6	2.2
20	2	8	2.1
25	1	9	2.0
30	0	10	1.9

Результаты показывают, что концентрация Fe^{2+} уменьшается с течением времени, тогда как концентрация Fe^{3+} увеличивается, что свидетельствует о прогрессирующем окислении сульфидных минералов. Снижение pH среды также подтверждает активность *Acidithiobacillus ferrooxidans*, которые производят серную кислоту в процессе окисления пирита и халькопирита. Этот процесс имеет несколько ключевых преимуществ: эффективное извлечение металлов, стабильность процесса, и контроль кислотности.

4.5 Экономическая часть

Основные затраты на процесс биоликации включают приобретение реагентов (серная кислота, питательная среда для бактерий), оборудование (реакторы, системы аэрации, термостаты), культивирование бактерий, и энергозатраты (поддержание температуры, аэрация).

Примерная оценка затрат:

Статья затрат	Сумма (USD)
Реагенты (серная кислота)	500
Питательная среда	300
Оборудование (реакторы, аэрация)	5000
Культивирование бактерий	1000
Энергозатраты	800
Итого	7600

Экономическая эффективность процесса оценивается на основании стоимости извлеченных металлов и снижения затрат на переработку отходов. Биоликвация позволяет извлекать металлы из руд с меньшими затратами на энергопотребление и без необходимости использования агрессивных химических реагентов, что также снижает расходы на утилизацию токсичных отходов.

Пример расчета экономической эффективности:

Показатель	Значение
Стоимость извлеченного Fe (за 1 кг)	3 USD
Стоимость извлеченного Cu (за 1 кг)	60 USD
Общие затраты на биоликвацию	7600 USD

Ожидаемая прибыль 15000 USD

Чистая прибыль 7400 USD

4.6 Экологический эффект

Обработка руды *Acidithiobacillus ferrooxidans* в процессе биологического выщелачивания более экологична. Все это приводит к сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу и уменьшению загрязнения водоемов и почв. Во-первых, этот процесс не требует высоких температур и агрессивных химикатов, что автоматически означает, что он менее энергозатратен и менее опасен для окружающей среды. Одним из наиболее важных аспектов является рекультивация нарушенных земель после добычи руды и ее переработки. Добавление растений и восстановление почвенного покрова будут способствовать общей реконструкции экосистем и биоразнообразия. Методы биологической рекультивации могут включать посадку устойчивых к природным условиям растений и восстановление плодородия почвы с помощью микроорганизмов. Биологическая обработка помогает уменьшить выбросы углекислого газа - например, она не выделяет CO₂ из-за снижения потребления энергии, особенно в связи с текущими проблемами изменения климата. Биологические методы значительно сокращают использование ископаемого топлива и в то же время сокращают выбросы парниковых газов.

Заключение

Полученные результаты подтверждают уже известную роль *Acidithiobacillus ferrooxidans* в окислении сульфидных минералов и ее потенциальное применение в промышленности и для защиты окружающей среды. Эксперименты показывают, что эта бактерия эффективна при окислении Fe²⁺ сульфидными соединениями в очень кислых условиях, что, следовательно, является полезным инструментом для таких применений, как биоликвация и геобиотехнология.

На основании полученных данных были сделаны выводы относительно особенностей роста и развития *Acidithiobacillus ferrooxidans* в различных условиях окисления сульфидных минералов. Полученные результаты могут послужить основой для разработки новых технологий в будущем, которые расширят возможности повышения эффективности процесса биоудаления, сократят его продолжительность и улучшат экологическую ситуацию в районах добычи полезных ископаемых.

Кроме того, было доказано, что промышленное применение микроорганизма *Acidithiobacillus ferrooxidans* обеспечивает экономическую эффективность извлечения металлов из руд и снижает их нагрузку на окружающую среду. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых методов и технологий не только специалистами в области биоочистки и биогеографии в условиях кислототрофии, но и учеными-исследователями биогеохимического цикла.

Таким образом, исследование, представленное в данной статье, можно считать весьма важным шагом на пути к более глубокому пониманию процессов окисления сульфидных минералов с участием *Acidithiobacillus ferrooxidans* и их применения в промышленности и экологии. Новые данные и выводы могут быть использованы для дальнейшего изучения применения этого организма в различных отраслях науки и промышленности.