

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова  
Кафедра химической и биохимической инженерии

Кенжембетова Карина Букенбаевна

Использование *A.Ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

6B05101 – Химическая и биохимическая инженерия

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра химической и биохимической инженерии

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой  
химической и  
биохимической инженерии»

Доктор PhD

А.А. Амитова

25 июня 2024г.



**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: «Использование *A. Ferrooxidans* для окисления сульфидных  
минералов»

По образовательной программе 6B05101 – Химическая и биохимическая  
инженерия

Выполнила

Кенжембетова К.Б.

Рецензент

Канд. техн. наук

К.А. Атанова О.В.

25 июня 2024г.



Научный руководитель

Канд. техн. наук

Г.С. Турысбекова Г.С.

25 июня 2024г.



Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова  
Кафедра химической и биохимической инженерии

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
«Химическая и  
биохимическая инженерия»  
Доктор И.Д  
А.А. Амитова  
2024г.



**ЗАДАНИЕ**

на выполнение дипломной работы

Обучающейся: Кенжембетова Карина Букенбаевна

Тема: «Использование A.Ferrooxidans для окисления сульфидных минералов»

Утверждена приказом проректора по академической работе университета №548  
П/О от «04» декабря 2023 г.

Срок сдачи законченной работы «\_\_»\_\_\_\_\_2024г.

Исходные данные к дипломной работе: Месторождение «Южный Максут»

Краткое содержание дипломной работы:

- а) литературный обзор
- б) материалы и методика исследования
- в) технологические исследования
- г) экономическая часть
- д) экологическая часть
- е) заключение

Перечень графического материала: представлены

Рекомендуемая основная литература: из 22 наименований

## ГРАФИК

подготовки дипломной работы

| Наименование разделов, перечень разрабатываемых запросов | Сроки представления научному руководителю | Примечание |
|--|---|------------|
| Литературный обзор                                       | 15.04.24г.                                | Выполнено  |
| Материалы и методика исследования                        | 25.05.24г.                                | Выполнено  |
| Технологические исследования                             | 20.04.24г.                                | Выполнено  |
| Экономическая часть                                      | 20.04.24г.                                | Выполнено  |
| Экологическая часть                                      | 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., кандидат техн. наук, профессор | 13.06.24г.      |  |
| Исследовательская часть | Турысбекова Г.С., кандидат техн. наук, профессор | 13.06.24г.      |  |
| Нормоконтролер          | Турысбекова Г.С., кандидат техн. наук, профессор | 13.06.24г.      |  |

Научный руководитель

Турысбекова Г.С.

Задание принял к исполнению обучающийся

Кенжембетова К.Б.

Дата

«13» июня 2024 г.

## АННОТАЦИЯ

В настоящее время из-за проблем с экологической безопасностью и снижением качества минерального сырья актуально развитие технологии биологического выщелачивания, и ключевым микроорганизмом является *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

В процессе эволюции отдельные представители филогенетически отдалённых групп микроорганизмов приобрели способность получать энергию за счёт окисления закисного железа, элементной серы и её восстановленных соединений или сульфидных минералов в кислых условиях среды.

В данной дипломной работе мы рассматриваем способы использования микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов, физиологию, генетику и биохимию бактерий, также их размножение, рост и развитие в определенных условиях среды.

**Ключевые слова:** сульфидные минералы, биологическое окисление, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, месторождение Южный Максут, бактериальное выщелачивание.

## АНДАТПА

Қазіргі уақытта экологиялық қауіпсіздік пен минералды шикізат сапасының төмендеуіне байланысты биологиялық шаймалау технологиясының дамуы өзекті болып табылады және негізгі микроорганизм *Acidithiobacillus ferrooxidans* болып табылады.

Эволюция процесінде микроорганизмдердің филогенетикалық алыс топтарының жекелеген өкілдері қышқыл орта жағдайында қышқыл Темірдің, элементтік күкірттің және оның тотықсызданған қосылыстарының немесе сульфидті минералдардың тотығуы арқылы энергия алу қабілетіне ие болды.

Бұл диссертацияда біз сульфидті минералдарды тотықтыру үшін *acidithiobacillus ferrooxidans* микроорганизмдерін, бактериялардың физиологиясын, генетикасын және биохимиясын, сондай-ақ олардың көбеюін, өсуін және белгілі бір орта жағдайында дамуын қарастырамыз.

**Түйін сөздер:** сульфидті минералдар, биологиялық тотығу, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, Оңтүстік мақсат кен орны, бактериялық шаймалау.

## ANNOTATION

Currently, due to problems with environmental safety and a decrease in the quality of mineral raw materials, the development of biological leaching technology is relevant, and the key microorganism is *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

In the course of evolution, individual representatives of phylogenetically distant groups of microorganisms acquired the ability to obtain energy due to the oxidation of nitrous iron, elemental sulfur and its reduced compounds or sulfide minerals in acidic environmental conditions.

In this thesis, we consider ways to use *Acidithiobacillus ferrooxidans* microorganisms for the oxidation of sulfide minerals, the physiology, genetics, and biochemistry of bacteria, as well as their reproduction, growth, and development in certain environmental conditions.

**Keywords:** sulfide minerals, biological oxidation, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, South Maksut deposit, bacterial leaching.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 8  |
| 1. Литературный обзор.....  | 11 |
| 2. Материалы и методика исследования.....                         | 11 |
| 2.1 Бактерии <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> .....          | 11 |
| 2.2 Сульфидные минералы.....                                      | 14 |
| 2.3 Месторождение Южный Максут.....                               | 16 |
| 2.3.1 АО «Баст».....  | 20 |
| 2.4 Выделение штаммов <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> ..... | 22 |
| 2.5 Культивирование <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> .....   | 23 |
| 2.5.1 Состав питательной среды 9К.....                            | 25 |
| 2.6 Адаптивность бактерий.....                                    | 26 |
| 2.7 Механизм бактериального выщелачивания.....                    | 28 |
| 3. Технологические исследования.....                              | 31 |
| 3.1 Технология выщелачивания сульфидных минералов.....            | 31 |
| 3.2 Оптимальные параметры процесса.....                           | 33 |
| 4. Экономическая часть.....                                       | 36 |
| 5. Экологическая часть.....                                       | 39 |
| 5.1 Техника безопасности.....                                     | 50 |
| Заключение.....   | 52 |
| Список использованной литературы.....                             | 54 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В настоящее время биогидрометаллургия – это наиболее многообещающая и развивающаяся отрасль добычи металла из сульфидных минералов. Традиционная пирометаллургическая технология наносит огромный экологический ущерб фауне и флоре из-за значительных выбросов углерода и двуокиси серы. Также использование природных ресурсов в большом количестве привел к резкому сокращению запасов богатых месторождений практически всех полезных ископаемых, снижению кондиций и значительному накоплению горнопромышленных отходов.

Сульфидные минералы представляют собой класс минералов, содержащих сульфид или дисульфид в качестве основного аниона. В них сосредоточены основные запасы цветных металлов. Извлечение цветных металлов традиционным гидрометаллургическим способом сдерживается «упорным» составом, которые получают при их обогащении концентратов, а также наличие в большинстве из них арсенопирита исключает пирометаллургию в связи с образованием ядовитых газообразных соединений мышьяка.

Для решения технологической проблемы получения цветных металлов из сульфидных концентратов эффективным способом является деструкция кристаллической решётки сульфидных минералов, которое обеспечивает перевод цветных металлов в раствор или вскрытие золота для его дальнейшей добычи традиционным гидрометаллургическим способом цианирования. Эта деструкция кристаллической решётки наиболее эффективно производится с помощью биологического окисления. Успешный опыт разработки и использования технологий биологического окисления показывает, что они являются наиболее простыми и безопасными для экологии способами переработки сульфидных концентратов. Введение в промышленность технологий биовыщелачивания сдерживается высокой себестоимостью в сравнении с традиционными методами. Главными минусами современных промышленных биогидрометаллургических технологий добычи цветных металлов из сульфидных концентратов являются низкая скорость биологического окисления и затраты на охлаждение реакторов, саморазогревание которых происходит из-за экзотермических реакций окисления сульфидных минералов.

В связи с перечисленными минусами актуальной проблемой для улучшения технологий биологического окисления сульфидных концентратов является ее

интенсификация, позволяющая снизить себестоимость получаемых цветных металлов, и, благодаря этому, расширить сырьевую базу для совершенствования и развития биогидрометаллургии.

### **Цель и задачи работы**

Целью дипломной работы является ознакомление с методами использования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов механизмы и параметры для оптимальных условий. Для того, чтобы достигнуть цели, поставлены следующие задачи:

- 1) Изучить механизм биологического выщелачивания;
- 2) Определить методы и оптимальные параметры окисления сульфидных минералов с помощью бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*;
- 3) Выделить преимущества и недостатки, а также потенциал метода;
- 4) Рассмотреть применение бактериального выщелачивания в месторождении Казахстана.

**Научная новизна.** Нам представлена концепция бактериально-химического окисления сульфидных минералов, которая предусматривает поэтапное проведение стадий химического выщелачивания культуральной жидкостью, которая содержит соединения трёхвалентного железа и стадий биологического окисления. Для максимального использования потенциала реакции химического окисления на стадии химического выщелачивания предлагается создание условия для активного протекания экзотермических процессов окисления сульфидных минералов. А на стадии биоокисления используется максимальный потенциал бактерий, осуществляющих биокатализ. В процессе второй стадий происходит полное разрушение кристаллической решётки.

При исследовании биологического окисления сульфидных минералов рентгенографическими методами впервые показано, что перед окислением серы изменяется ее кристаллическая структура. Это связано с продуктами метаболизма используемых бактерий и не зависит от минерала, который окисляется. В связи с этими наблюдениями было установлено, что культуральная жидкость, которая содержит соединения трёхвалентного железа, полученная при биологическом окислении соединений двухвалентного железа, является более активным окислителем, чем раствор соли  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ , полученный химическим путем.

Было показано, что предварительное химическое выщелачивание арсенопиритных и пиритных концентратов культуральной жидкостью, которая содержит трёхвалентное железо, при повышенной температуре (50–80°C) повышает скорость и глубину последующего биологического окисления сульфидных минералов бактериями.

## 1. Литературный обзор

Были рассмотрены основные направления, методы в переработке сульфидных минералов в Казахстане на примере месторождения Южный Максут и горнорудной компании АО «БАСТ». Показаны перспективность применения биогидрометаллургии, проведен анализ самых эффективных технологических приёмов биологического окисления различных концентратов. Были описаны наиболее перспективные микроорганизмы, которые используются в технологических процессах, а именно бактерии *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

## 2. Материалы и методика исследования

### 2.1 Бактерии *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Бактерии *Acidithiobacillus ferrooxidans* – это ацидофильные (кислотолюбивые) хемолитотрофные бактерии, которые получают энергию за счет окисления железа (II) и неорганических соединений серы. Широко используются в геобиотехнологии, включая горное дело, геохимическое обогащение руд и очистку загрязненных окружающих сред.

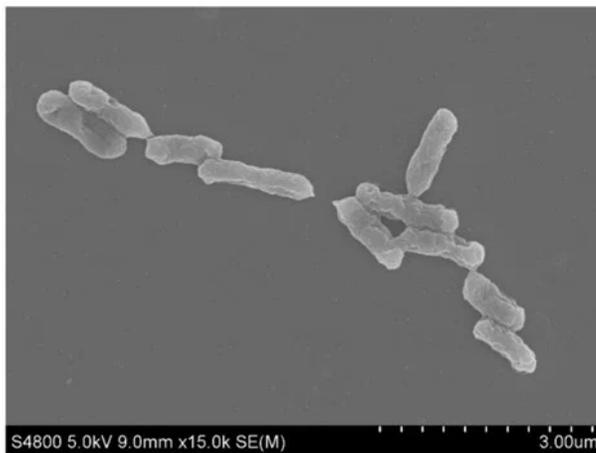


Рисунок 2.1.1 – Бактерии *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Микроорганизм имеет вид коротких палочек, которые иногда расположены парами, но чаще всего поодиночке, размером 0,4 x (0,8–1) мкм (рис. 2.1.1).

Основными биохимическими реакциями, которые обеспечивают необходимую энергию для жизнедеятельности бактерий и создают кислую среду, способствующую выщелачиванию металлов из руд, являются окисление железа (II) до железа (III) и окисление сульфидов до сульфатов.

Окисление железа:



Окисление сульфидов:



Геномы *Acidithiobacillus ferrooxidans* были полностью секвенированы, что позволяет изучать их генетическое разнообразие и метаболические пути, а также их адаптацию к кислотной и металлосодержащей среде.

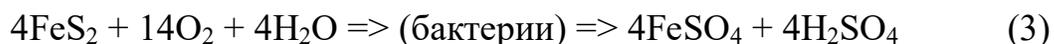
Геном *Acidithiobacillus ferrooxidans* имеет множество генов, которые кодируют белки, участвующие в процессах окисления серы и железа. Ген *Rus* является одним из ключевых, который кодирует белок *Rusticyanin*, играющий главную роль в окислении железа (II). А также присутствие различных ферментов пермеаз и оксидоредуктаз обеспечивает высокоэффективный транспорт ионов через мембрану бактерий, что делает *A. Ferrooxidans* отличным биокатализатором.

По физиологии *Acidithiobacillus ferrooxidans* являются грамотрицательными, неспорообразующими коккобациллами или бациллами. В процессе жизнедеятельности их метаболизм способен окислять железосодержащие минералы, такие как пирит, с ферросоединениями и/или органическими соединениями в качестве доноров электронов, используя кислород в качестве конечного акцептора электронов. Бактерии обычно обитают в кислых и окисленных средах, таких как рудные отвалы, водные растворы, содержащие сульфидные минералы. Они играют важную роль в процессах биологического обогащения руд и геохимического извлечения металлов, также используются для очистки сточных вод и загрязнённых почв от тяжёлых металлов.

Использование микроорганизмов для извлечения металлов преследует одну из двух целей: превращение (или окисление) нерастворимых сульфидов в растворимые сульфаты или обеспечение условий для лучшего взаимодействия химических соединений с поверхностью минерала и растворение целевого металла. Для первого процесса примером является превращение таких нерастворимых соединений как коллевин ( $\text{CuS}$ ) или халькозин ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), в растворимые сульфаты. А примером второго процесса может служить процесс извлечения железа, серы и мышьяка из арсенопирита ( $\text{FeAsS}$ ), в результате чего оставшееся в минерале золото извлекается при помощи цианирования. Два этих процесса являются окислительными. Если целевой металл переводится в раствор – это процесс биологического выщелачивания, а когда металл остаётся в руде – это процесс биологического окисления. Но термин «биовыщелачивание» применяется в обоих случаях.

Ученые Сильверман и Эрих в 1964 году совершили первую попытку объяснить механизм биовыщелачивания и предположили два возможных пути: прямой и непрямой.

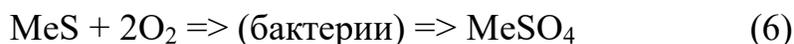
Прямое бактериальное выщелачивание происходит при физическом и тесном контакте бактерий с минералом в несколько стадий, которые катализируются ферментами:



В сумме:



Таким образом, прямое бактериальное выщелачивание можно описать реакцией:



При процессе непрямого биовыщелачивания бактерии выделяют «окислитель», который химически окисляет сульфидные минералы. В кислых растворах этим окислителем служит, и растворение металла можно описать реакцией:



При непрямом выщелачивании микроорганизмам не нужен контакт с поверхностью руды. Они выполняют роль катализатора, ускоряя окисление железа. При значениях рН 2,0–3,0 окисление бактериями протекает в  $10^5$ – $10^6$  раз быстрее в сравнении с химическим окислением.

Методика исследования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* в Казахстане, как и в других странах, включает различные этапы и техники, которые направлены на изучение их физиологии, биологических свойств, так же потенциального применения в различных отраслях, таких как биотехнология, горное дело, экология и другое. Рассмотрим общую методику исследования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*:

1) Изоляция и выделение штаммов: первым шагом в исследовании *Acidithiobacillus ferrooxidans* является изоляция и выделение чистых культур бактерий из образцов горных пород, руд или окружающей среды. Это может

включать сбор образцов, инкубацию в различных средах и методы разведения на питательных агарах.

2) Определение физиологических характеристик: после изоляции штаммов проводятся исследования физиологических характеристик, таких как оптимальные условия роста (температура, pH, концентрация кислорода), скорость роста, скорость окисления сульфидов и т. д.

3) Молекулярно-генетические анализы: для идентификации и классификации изолированных штаммов могут проводиться молекулярно-генетические анализы, такие как секвенирование генома, полимеразная цепная реакция (ПЦР), анализ ДНК и РНК и другие методы.

4) Исследование механизмов окисления: *Acidithiobacillus ferrooxidans* известен своей способностью окислять сульфиды и металлы. Исследования механизмов этого процесса могут включать изучение ферментов, участвующих в окислительной цепи, и анализ биохимических путей.

5) Применение в горнометаллургическом производстве: *Acidithiobacillus ferrooxidans* может использоваться для биологического обогащения руд или очистки стоков от шламов и отходов, что может быть предметом исследований в контексте горного и металлургического производства.

## 2.2 Сульфидные минералы

Сульфидные минералы – это минералы, в которых полезные ископаемые находятся в химических соединениях с серой. Сера является примесным металлом при добыче чистых металлов. Избавления от сернистых соединения достаточно долгий и трудоёмкий процесс.

К основным сульфидным минералам относят пирит, марказит, вюртцит, халькопирит, сфалерит и пирротин, а к менее распространённым – арсенопирит, троилит, борнит, галенит, дигенит, кубанит, халькозин и другое.



*Рисунок 2.2.1 – Пирит*

Пирит – это дисульфид железа  $\text{FeS}_2$ , самый распространённый сульфид в земной коре (рисунок 2.2.1). Имеет золотисто-жёлтый цвет. Основными примесями являются Ni, Co, Cu, Au, As, Se, Tl. Пиритовые минералы – основные источники сырья для получения медного купороса и серной кислоты.



Рисунок 2.2.2 –  
Марказит

Марказит, как и пирит, является дисульфидом железа  $\text{FeS}_2$ , но он отличается от него тем, что из-за строения внутренней кристаллической решётки обладает большей хрупкостью и меньшей твёрдостью (рис. 2.2.2). Марказит не устойчив на поверхности, это влечёт его разложение, особенно при высокой влажности. Этот минерал является вторым по распространённости. Также обладает сильным плеохроизмом, который варьируется от светло-коричневого до тёмно-зелёного, встречается в виде радиальных лейст, образующих глобулярные структуры, в ядрах таких структур часто встречаются кристаллы пирита.

Пирротин имеет огненно-красный или тёмно-оранжевый цвет, широко распространён в гипогенных месторождениях медно-никелевых руд (рис. 2.2.3). Содержание железа может значительно варьироваться. Основные примеси: Ni, Co. Пирротин используется так же для получения серной кислоты.

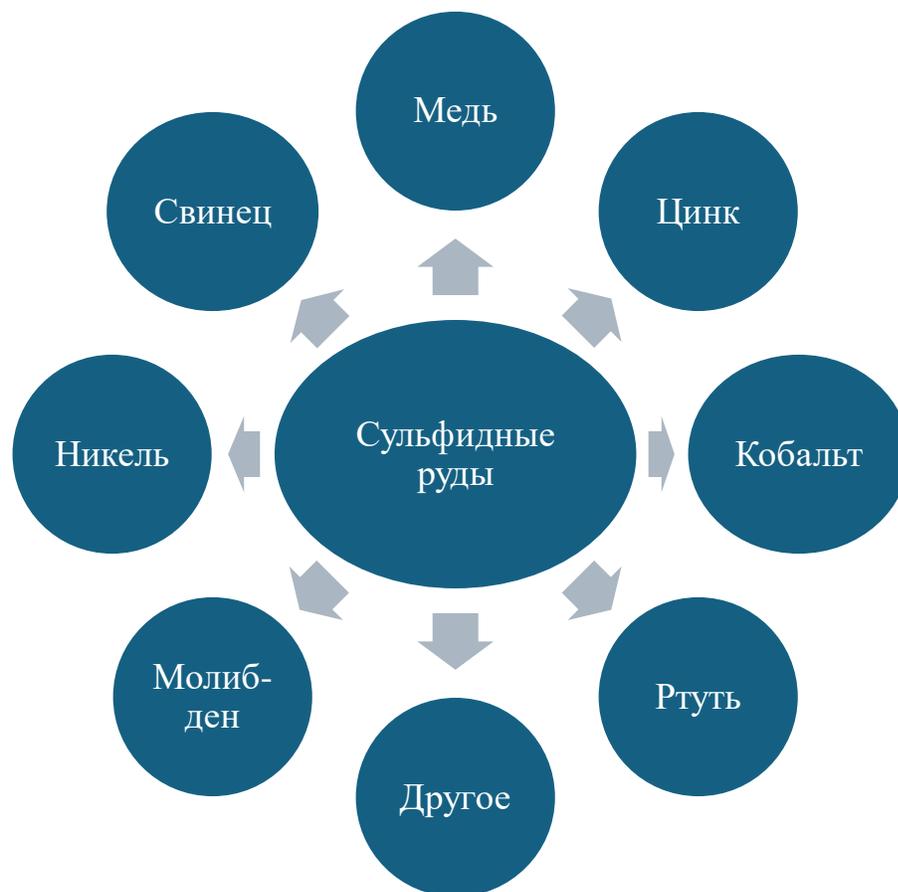


Рисунок 2.2.3 –  
Пирротин

Халькопирит  $\text{CuFeS}_2$  – основной минерал для получения меди. Имеет золотисто-жёлтый цвет. Минерал хрупкий и неустойчивый и в процессе выветривания разрушается. Халькопирит является широко распространённым минералом.

Сульфидные руды – важный источник для получения цветных металлов (Диаграмма 1).

Диаграмма 1 – Цветные металлы, получаемые из сульфидных руд



В зависимости от соотношений сульфидов и других минералов сульфидные руды делятся на сплошные, массивные, с преобладанием сульфидов, прожилковые, или вкраплённые, с преобладанием несulfидных минералов. Так же руды, содержащие один ценный компонент, называются монометаллические, а содержащие несколько ценных элементов – полиметаллические.

### 2.3 Месторождение Южный Максут

Месторождение Максут расположен в Абайском районе Восточно-Казахстанской области, в 107 км к югу от города Семей, в 60 км к северо-западу от железнодорожной станции Чарск (город Шар). Казахстана. Координаты центра участка Южный Максут:  $49^{\circ}31'$  с. ш. и  $80^{\circ}10'$  в. д. (рисунок 2.3.1). Район работ расположен в центральной части Западно-Калбинской структурно-формационной зоны, вблизи сопряжения ее с Жарма-Саурской зоной.

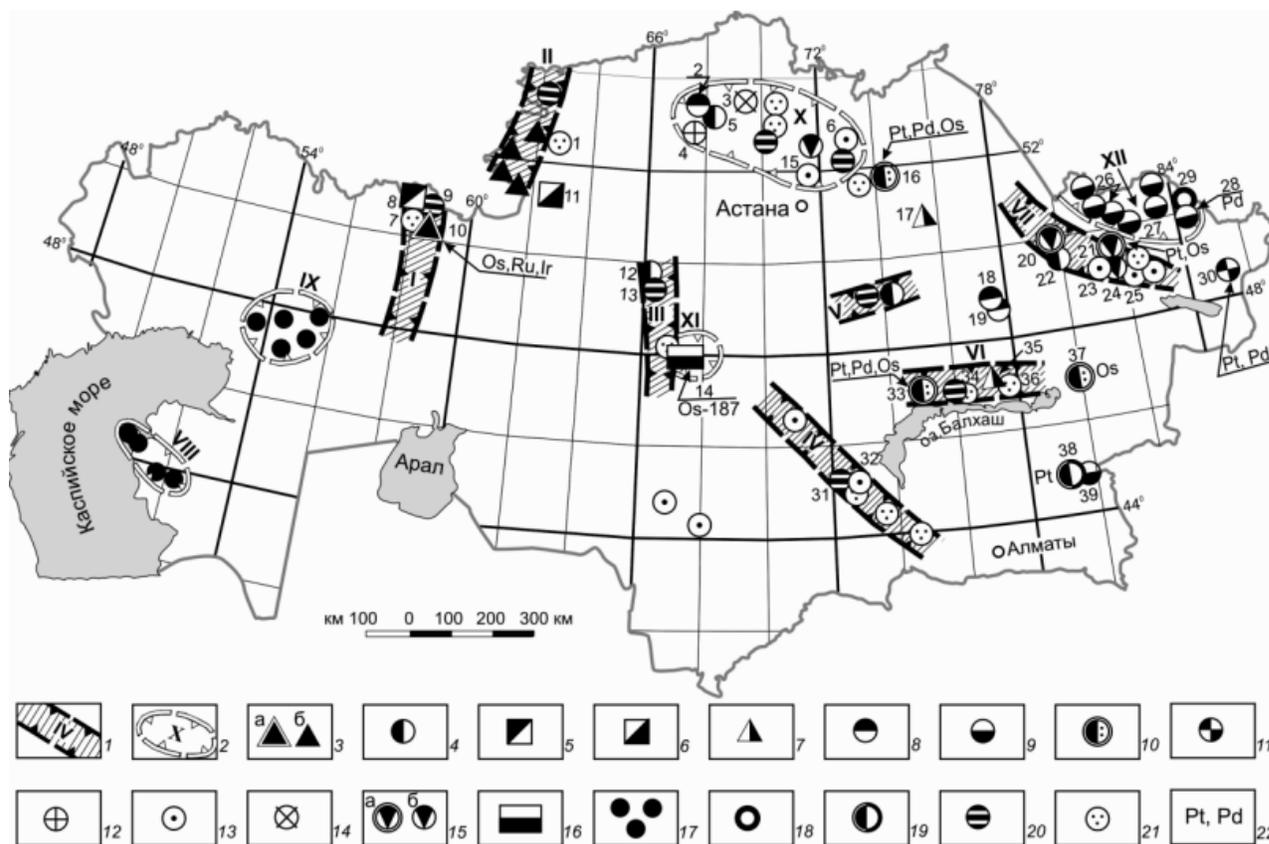


Рисунок 2.3.1 – Схема платиноносности территории Казахстана (составил М.С.Рафаилович [2008] с использованием материалов КазИМСа, ИГН имени К.И. Сатпаева, территориальных управлений Комитета геологии и недропользования РК, ВНИИцветмета, АО Стенгеология, Томского политехнического университета):

4 – сульфидная платиноидно-медно-никелевая (5 – Златогорское, 12 – Каратургайское, 22 – Южный Максут)

Месторождение расположено в ареале развития Cu-Ni оруденения и относится к группе магматических месторождений ликвационного класса (по Смирнову В.И.). В геологическом строении включены две рудоносные габброидные интрузии – это Северный и Южный Максут, площадь которых составляет 6 и 2,5 км<sup>2</sup> соответственно (рисунок 2.3.2). Южно-Максутский массив является наиболее исследованным в геологическом отношении, был выявлен в 1973 г. в результате работы В. А. Денисенко с сотрудниками.

Участок Южный Максут расположен в южной части площади месторождения и приурочен к Южному массиву габброидов. Сульфидные

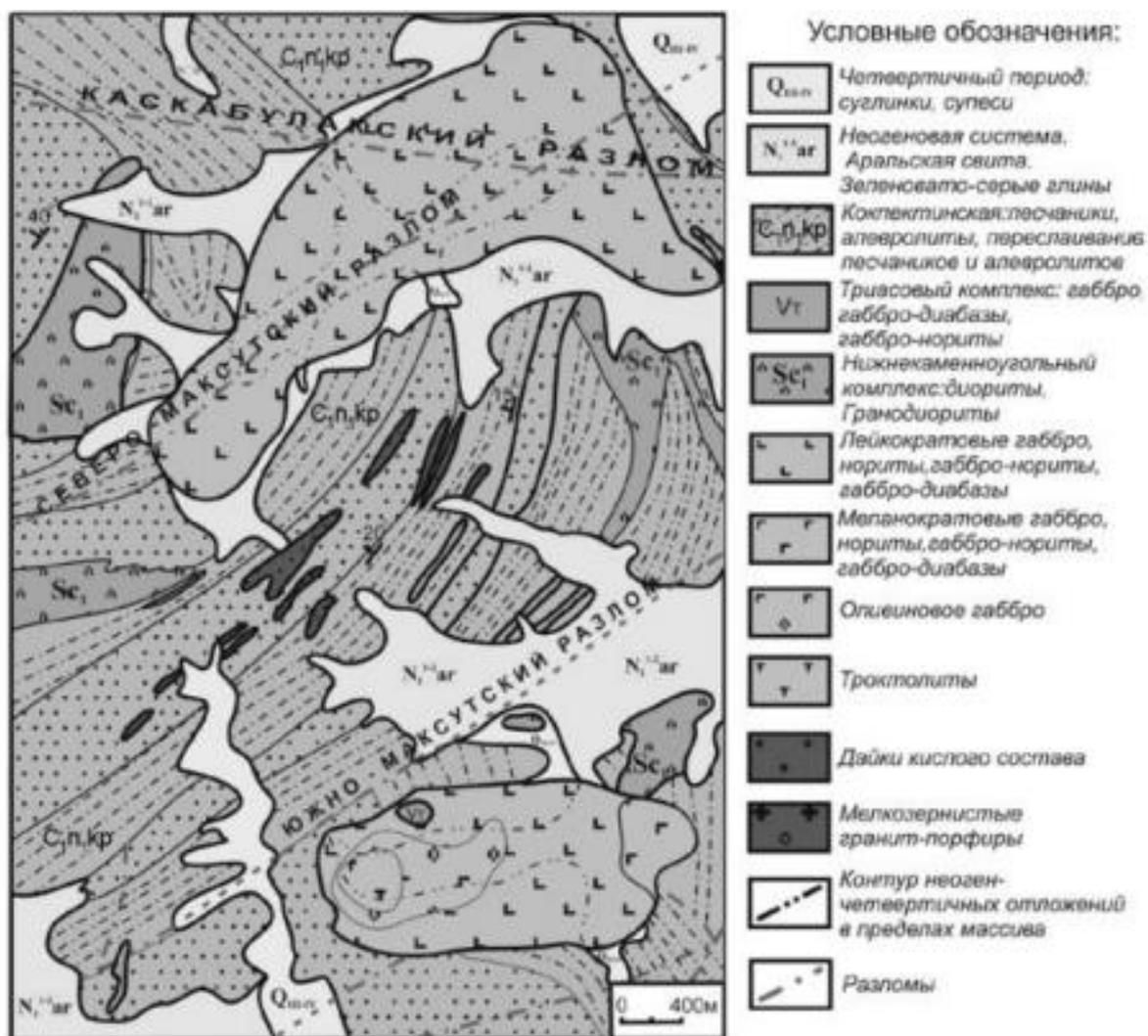


Рисунок 2.3.2 - Геологическая схема месторождения Максут (по неопубликованным материалам Ю. А. Антонова, Б. В. Александрова, Г. В. Шестакова).

минералы были сформированы в результате магматических процессов с наложением гидротермальных.

Основными рудными минералами, в порядке убывания, являются: пирротин, ильменит, халькопирит, пентландит, виоларит, магнетит и титаномагнетит, пирит. Второстепенные рудные минералы: галенит, сфалерит, марказит, миллерит, в единичных случаях встречается мельниковит-пирит. Породообразующие минералы представлены в основном пироксеном, меньше - слюдой (биотитом), полевыми шпатами, хлоритом, роговой обманкой, серпентином. Количественный минеральный состав руды приведены в таблице 2.3.1.

| Минерал      | Fe    | Cu    | Co    | Ni    | S     | Pb    | Bi   | Te    | Pd   | Rh   | Cd   | Sb   | As    | Сумма  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|--------|
| Халькопирит  | 30.18 | 34.40 | 0.00  | 0.03  | 34.91 | 0.03  | 0.00 | н/о   | н/о  | н/о  | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 99.54  |
| Халькопирит  | 30.28 | 34.77 | 0.00  | 0.00  | 34.84 | 0.01  | 0.03 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.93  |
| Халькопирит  | 30.17 | 34.58 | 0.00  | 0.00  | 35.11 | 0.07  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.93  |
| Халькопирит  | 30.38 | 34.49 | 0.00  | 0.00  | 34.86 | 0.1   | 0.02 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.85  |
| Халькопирит  | 30.49 | 34.24 | 0.01  | 0.00  | 34.88 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.62  |
| Пирротин     | 60.00 | 0.00  | 0.03  | 0.6   | 39.1  | 0.12  | 0.00 | н/о   | н/о  | н/о  | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 99.84  |
| Пирротин     | 59.89 | 0.00  | 0.03  | 0.7   | 39.21 | 0.06  | 0.00 | н/о   | н/о  | н/о  | 0.00 | 0.01 | 0.00  | 99.9   |
| Пирротин     | 59.51 | 0.08  | 0.02  | 0.42  | 39.76 | 0.07  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.89  |
| Пирротин     | 59.87 | 0.03  | 0.00  | 0.76  | 39.17 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.83  |
| Пирротин     | 59.85 | 0.00  | 0.02  | 0.88  | 39.1  | 0.03  | 0.03 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.91  |
| Пирит        | 45.25 | 0.00  | 0.05  | 1.84  | 52.82 | 0.08  | 0.00 | н/о   | н/о  | н/о  | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 100.08 |
| Пирит        | 43.44 | 0.00  | 0.04  | 3.57  | 52.72 | 0.13  | 0.00 | н/о   | н/о  | н/о  | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 99.9   |
| Пирит        | 46.58 | 0.01  | 0.00  | 1.04  | 52.16 | 0.13  | 0.02 | н/о   | н/о  | н/о  | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.93  |
| Пирит        | 45.87 | 0.02  | 0.00  | 1.07  | 52.26 | 0.05  | 0.00 | н/о   | н/о  | н/о  | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.27  |
| Виоларит     | 25.55 | 0.03  | 2.88  | 27.44 | 42.12 | 0.11  | 0.00 | н/о   | н/о  | н/о  | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 98.14  |
| Виоларит     | 21.35 | 0.04  | 2.8   | 32.3  | 41.86 | 0.11  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | н/о  | н/о  | 0.00  | 98.46  |
| Пендландит   | 27.31 | 0.01  | 3.67  | 34.66 | 33.77 | 0.11  | 0.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00 | н/о  | н/о  | 0.00  | 99.53  |
| Пендландит   | 25.83 | 0.03  | 2.86  | 26.96 | 42.59 | 0.06  | 0.02 | н/о   | н/о  | н/о  | 0.02 | 0.00 | 0.00  | 98.39  |
| Ni-глаукодот | 2.54  | 0.03  | 19.36 | 14.3  | 20.13 | 0.00  | 0.00 | 0.1   | 0.01 | 0.00 | н/о  | н/о  | 44.86 | 101.33 |
| Ni-глаукодот | 2.65  | 0.03  | 19.08 | 13.99 | 20.25 | 0.00  | 0.02 | 0.12  | 0.01 | 0.03 | н/о  | н/о  | 44.13 | 100.31 |
| Алтаит       | 2.18  | 1.53  | 0.00  | 0.00  | 0.147 | 60.22 | 0.1  | 34.67 | 0.00 | 0.03 | н/о  | н/о  | 0.00  | 98.88  |
| Алтаит       | 2.04  | 0.91  | 0.00  | 0.02  | 0.056 | 60.33 | 0.19 | 36.67 | 0.00 | 0.04 | н/о  | н/о  | 0.00  | 100.26 |

Таблица 2.3.1 – Состав основных рудных минералов месторождения Южный Максут.

Примечание: н/о – содержание не определялось. Результаты микрорентгеноспектрального анализа на приборе «Сатебах-микро», ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. Аналитики: Л. Н. Поспелова, О. С. Хмельнико.

### 2.3.1 АО «Баст»

АО «БАСТ» – горнорудная компания по добыче и переработке медно-никелевой руды месторождения Максут (участок Южный Максут).

В состав предприятия АО «БАСТ» входят участки:

- карьер по добыче медно-никелевых руд месторождения Максут (участок Южный Максут);
- вахтовый посёлок;
- дробильно-сортировочный комплекс (ДСК);
- цех по обогащению руды с хвостохранилищем;
- аналитическая лаборатория.

Эти участки в процессе своей работы воздействуют на экологическое состояние местности. Более подробная информация о загрязняющих процессах описана в экологической части дипломной работы.

Компания использует различные методы бактериального выщелачивания на производстве, которые описаны ниже и выделены их плюсы и минусы:

1) Кучное выщелачивание: данный метод основан на создании больших куч руды, на которые в дальнейшем распыляется раствор с микроорганизмами. Окисляя металл, бактерии способствуют высвобождению металлов в раствор.

Плюсы:

- Простота организации метода.
- Низкая стоимость.
- Переработка больших объёмов бедных руд.

Минусы

- Длительность (весь процесс может длиться от нескольких месяцев до нескольких лет).
- Зависимость от климата.

2) Выщелачивание в танках: руда или концентрат помещают в специальные резервуары – танки, где можно поддерживать и контролировать среду для бактерий. Для того, чтобы обеспечить равномерное выщелачивание, раствор с микроорганизмами постоянно циркулирует.

Плюсы:

- По сравнению с кучным выщелачиванием является более быстрым процессом.

- Есть возможность точного контроля параметров процесса (концентрация бактерий, температура, pH).

Минусы:

- Высокие траты на оборудование.
- Ограниченный объём материала, который перерабатывается.

3) Выщелачивание внутри шахт: применяется для выщелачивания металлов в шахтах. В процессе этого метода раствор с микроорганизмами закачивается в шахты, где бактерии окисляют сульфидные минералы.

Плюсы:

- Есть возможность использования старых и выработанных шахт.
- Минимальное воздействие на поверхность земли.

Минусы:

- Сложность контролирования процесса.
- Постоянный мониторинг состояния шахт.

4) Подземное выщелачивание: в рудное тело под землей закачивается раствор с бактериями. Микроорганизмы окисляют минералы и высвобождают металлы.

Плюсы:

- Сниженное воздействие на окружающую среду.
- Минимальные затраты на перемещение руд.

Минусы:

- Трудно контролировать и управлять процессом.
- Возможность загрязнения грунтовых вод.

5) Биосорция и биопреципитация: данные методы основаны на способностях микроорганизмов соответственно сорбировать и осаждают металлы из растворов.

Плюсы:

- Высокое извлечение металлов.
- Можно использовать вторичные ресурсы.

Минусы:

- Поддержка и развитие специальных микроорганизмов.
- Технологическая сложность процессов.

В зависимости от типа руды, экономических и экологических условий, оптимизируя процессы для максимальной эффективности и минимизации воздействия на окружающую среду АО «БАСТ» использует данные методы.

#### **2.4 Выделение штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans***

Выделение штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans* обычно происходит на специализированных средах, способных поддерживать их рост и размножение. Общий процесс выделения штаммов можно описать так:

1) Подготовка образцов: Образцы для выделения штаммов могут быть собраны из природной среды, такой как горные породы, рудные отвалы или водные отложения, также они могут быть взяты из существующих культур или из лаборатории.

2) Разведение на питательных средах: Образцы переносятся на питательные агары или в жидкие среды, специально подготовленные для культивации *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Эти среды обычно содержат сульфидные минералы (например, пирит или халькопирит) как источник энергии для бактерий, а также неорганические соли и другие компоненты, необходимые для их роста.

3) Инкубация: после переноса образцов на питательные среды, они инкубируются в специальных условиях, обеспечивающих оптимальные температуру, pH и доступ кислорода. Это может включать инкубацию в аэробных условиях или в условиях, близких к анаэробным, в зависимости от типа исследуемых бактерий.

4) Отбор изолятов: после инкубации и роста на питательных средах отбираются отдельные клеточные колонии или культуры бактерий, представляющие собой потенциальные штаммы *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Отбор может осуществляться на основе морфологических признаков, таких как форма, размер и цвет колоний.

5) Подтверждение и идентификация: Выделенные изоляты далее подвергаются различным тестам и анализам для подтверждения их принадлежности к виду *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Это может включать микробиологические, биохимические и молекулярно-генетические методы идентификации.

б) Сохранение и хранение: Выделенные штаммы могут быть сохранены, и храниться при оптимизированных условиях в лаборатории для последующего использования и распространения.

Эти этапы выделения штаммов бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* можно адаптировать под необходимые условия и потребности для успешной реализации исследовательских работ и приложений в области горнодобывающей отрасли и биотехнологии Казахстана.

## 2.5 Культивирование *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Подбор условий для культивирования новых штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans*, который способствует активному накоплению биомассы на стадии ее наращивания до внесения в выщелачиваемые субстраты, позволяет значительно повысить интенсивность процесса биовыщелачивания.

Для культивирования требуется специализированных питательных сред, которые будут обеспечивать оптимальные условия для роста и размножения *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Основные шаги процесса культивирования:

1) Выбор питательной среды: питательная среда для культивирования *Acidithiobacillus ferrooxidans* должна содержать компоненты, необходимые для их метаболической активности и жизнедеятельности. Чаще всего используются минеральные соли, такие как сульфаты железа и аммония, а также органические вещества, которые будут служить источниками углерода и азота. Сульфидные минералы, такие как пирит, могут быть добавлены в качестве источника энергии.

2) Стерилизация: все питательные среды и оборудование проходят процесс стерилизации для предотвращения контаминации. Стерилизация осуществляется следующими методами:

- Автоклавирование при температуре 121°C и давлении 1 атм в течение 20 минут.
- Фильтрация через мембранные фильтры для термочувствительных компонентов.

3) Инокуляция: проводится в асептических условиях. Для этого используются:

- Лабораторные штаммы *Acidithiobacillus ferrooxidans*, предварительно активированные на жидких питательных средах.

- Стерильные инструменты, такие как пипетки и петли, для переноса культур в питательную среду.

4) Условия культивирования: для успешного роста *Acidithiobacillus ferrooxidans* необходимо создать оптимальные условия культивирования, включающие:

- Температурный режим: Оптимальная температура для роста составляет 28-30°C.

- pH среды: Поддержание кислотности на уровне 1,5–2,5.

- Аэрация: Обеспечение доступа кислорода путем аэрации жидких культур в биореакторах или инкубаторах с перемешиванием.

5) Масштабирование: для промышленных целей необходимо масштабирование процесса культивирования. Это включает использование биореакторов и ферментеров различной емкости:

- Лабораторные биореакторы объемом до 10 литров для оптимизации условий роста.

- Пилотные установки объемом до 100 литров для тестирования масштабирования.

- Промышленные биореакторы объемом в тысячи литров для массового производства бактериальных культур.

6) Контроль и мониторинг: В процессе культивирования ведется постоянный контроль и мониторинг параметров:

- Контроль pH и температуры с помощью автоматических датчиков.

- Мониторинг концентрации ионов железа (II) и (III) для оценки метаболической активности бактерий.

- Определение концентрации бактериальных клеток методом оптической плотности или прямого подсчета клеток под микроскопом.

7) Сбор и хранение культур: после завершения культивирования культуры собираются и хранятся для последующего использования:

- Сбор биомассы методом центрифугирования или фильтрации.

- Хранение в холодильниках при температуре 4°C для кратковременного хранения или в замороженном виде при -80°C для длительного хранения.

Это общий процесс культивирования данных бактерий, но он может быть адаптирован в зависимости от конкретных целей исследования и доступных ресурсов.

### 2.5.1 Состав питательной среды 9к

Главными компонентами питательных сред, которые используются в процессах биологического выщелачивания, являются сульфат аммония и фосфат калия как источники биогенных элементов для построения бактериальной клетки. Наиболее используемой питательной средой для выщелачивания микроорганизмов является среда 9К и ее различные вариации.

Питательная среда 9К (или среда Silverman and Lundgren) — это одна из широко используемых и эффективных сред для культивирования хемолитотрофных бактерий, к которым относятся *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Её общий состав:

Компоненты:

- Аммоний сульфат ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- Сульфат железа (II) (FeSO<sub>4</sub>)
- Магний сульфат (MgSO<sub>4</sub>)
- Марганцевый сульфат (MnSO<sub>4</sub>)
- Фосфат калия (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)
- Гидроксид натрия (NaOH)
- Гидроксид калия (KOH)
- Карбонат калия (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)
- Масляная кислота (H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)

Рецепт:

- Аммоний сульфат: 10 г/л
- Сульфат железа (II): 1 г/л
- Магний сульфат: 0,1 г/л
- Марганцевый сульфат: 0,02 г/л

- Фосфат калия: 0,5 г/л
- Гидроксид натрия: 1 г/л
- Гидроксид калия: 1 г/л
- Карбонат калия: 1 г/л
- Масляная кислота: 2 мл/л

Приготовление и хранение:

— Все компоненты взвешивают с высокой точностью, и для этого рекомендуется использовать аналитические весы.

— Дистиллированную воду разогревают до температуры около 50°C, добавляют все компоненты, кроме сульфата железа (II), и тщательно перемешивают до полного растворения.

— Сульфат железа (II) добавляется в последнюю очередь при минимальном контакте с воздухом или в анаэробных условиях, так как он может окисляться при высоких температурах и в присутствии кислорода.

— Полученный раствор фильтруют через фильтр (0.2 мкм) для удаления возможных примесей.

— Для стерилизации среда автоклавируется при температуре 121°C в течение 15–20 минут.

— После стерилизации питательная среда разливается в стерильные флаконы и хранится при температуре 4°C до использования.

Это базовый процесс приготовления и состав питательной среды 9К. В зависимости от конкретных целей и условий культивирования, состав среды может быть адаптирован для оптимизации роста и метаболической активности *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

## 2.6 Адаптивность бактерий

Бактерии *Acidithiobacillus ferrooxidans* известны своей высокой адаптивностью к экстремальным условиям окружающей среды, что делает их ключевыми микроорганизмами в биогидрометаллургических процессах. Их способность выживать и функционировать в условиях низкого рН, высокой концентрации металлов и ограниченного доступа к питательным веществам обусловлена рядом биологических и физиологических механизмов.

1) Адаптация к кислым условиям: *Acidithiobacillus ferrooxidans* являются ацидофильными организмами, что означает их способность процветать в кислых средах с рН от 1 до 4. Адаптация к таким условиям включает:

- Регуляция внутреннего рН: Клеточные мембраны бактерий содержат протонные насосы, которые активно выводят избыток протонов из клетки, поддерживая внутренний рН на уровне около 6,5.

- Синтез кислотоустойчивых белков: Белки этих бактерий устойчивы к денатурации в условиях высокой кислотности, что позволяет им сохранять функциональность.

2) Метаболическая пластичность: *Acidithiobacillus ferrooxidans* способны окислять различные субстраты, такие как железо (II), сульфиды и элементарную серу. Эта метаболическая пластичность позволяет им адаптироваться к изменениям в составе среды:

- Окисление железа (II): Основной путь получения энергии, который включает ферменты респираторной цепи, специфичные для окисления ионов железа (II).

- Окисление сульфидов и серы: в условиях дефицита железа бактерии могут переключаться на окисление других неорганических субстратов.

3) Толерантность к тяжелым металлам: *Acidithiobacillus ferrooxidans* обладают высокой устойчивостью к токсичным концентрациям тяжелых металлов, таких как медь, цинк и уран. Это достигается благодаря:

- Экспрессии металлосвязывающих белков: Белки, такие как металлотионины, связывают и нейтрализуют ионы тяжелых металлов внутри клетки.

- Экспортным системам: Специфические белковые комплексы (например, системы CzсABC) выкачивают ионы тяжелых металлов из клетки, предотвращая их накопление до токсичных уровней.

4) Биообратная связь и регуляция: *Acidithiobacillus ferrooxidans* могут регулировать свою активность в зависимости от условий окружающей среды благодаря системам сигнализации и регуляции генов:

- Двухкомпонентные системы регуляции: включают сенсорные киназы и регуляторные белки, которые изменяют экспрессию генов в ответ на внешние сигналы.

- Кворум-сенсинг: Механизм, позволяющий бактериям координировать свою активность в зависимости от плотности популяции, что важно для формирования биопленок и колоний.

А некоторые штаммы обладают способностью к росту и активности при повышенных температурах, что позволяет адаптироваться к горячим средам, даже те, которые могут образовываться в результате горнодобывающих процессов.

Эти адаптивные особенности бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* делают их ценными организмами для использования в различных промышленных и экологических отраслях, включая горнодобычу, биологическую очистку сточных вод и биотехнологические процессы.

## 2.7 Механизм бактериального выщелачивания

Условия благоприятные для окисления в рудах месторождений способствует протеканию процессов выщелачивания и окисления сульфидов, при которых сера и металлы переходят в водорастворимые соединения и выщелачиваются. Раньше окисление сульфидных минералов рассматривали как чисто химический процесс, основными агентами которого являются кислород из воздуха и продукты окисления сульфидов (сульфаты металлов и серная кислота). Хорошим окислителем сульфидов является сульфат закиси железа. Реакция окисления сульфида сульфатом закиси железа:



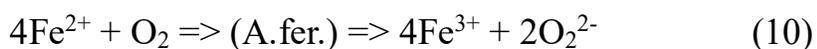
В результате реакции (5) сульфат закиси железа в кислых растворах медленно окисляется до сульфата окиси железа. Но в присутствии тионовых железобактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* процесс окисления проходит в 180000 раз быстрее. В месторождениях рудных тел встречаются и другие микроорганизмы кроме этих, которые населяют практически все ниши месторождений сульфидных минералов, рН которых варьируется от 0,5 до 10.

Тионовые бактерии являются хемолитоавтотрофами, то есть в энергетическом процессе с участием этих бактерий источником электронов являются неорганические вещества. Основной тип питания микроорганизмов – система автотрофной ассимиляции углекислоты в органические вещества.

Самым легко окисляемым субстратом для железобактерий является закисное железо, окисляемое с их участием в кислой среде до окисного:



У микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrooxidans* электроны от внешнего энергетического субстрата передаются на молекулярный кислород по цепи переносчиков с образованием воды:



В этом процессе кроме переноса электронов освобождается и используется энергия путём трансформации в химическую энергию фосфатных связей при синтезе аденозинтрифосфата (АТФ) из аденозиндифосфата (АДФ) и неорганического фосфора.

Также кроме закисного железа бактерии *A.ferrooxidans* используют восстановленные соединения серы (тиосульфты, тритионаты, тетратионаты и элементарную серу) как энергетический источник, в результате конечным продуктом окисления является сульфат-ион.

По многочисленным исследованиям было установлено, что *Acidithiobacillus ferrooxidans* участвуют в окислении практически всех сульфидных минералов.

Сульфидные минералы окисляются бактериями даже когда их системы железоокисления подавлены. В этом случае минералы окисляются путем прямого воздействия бактерий на кристаллическую решетку минералов, в то время как реакции окисления закиси железа, элементарной и сульфидной серы играют косвенную роль.

Процесс бактериального окисления минерального субстрата можно описать как взаимодействие:

- клеток и их метаболитов с кристаллической решеткой на поверхности минералов;
- клеток, их метаболитов с элементами кристаллической решетки в жидкой фазе.

Первая стадия взаимодействия микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrooxidans* с сульфидным субстратом – это закрепление бактерий на поверхности, далее происходит химическое превращение данного субстрата. Эти бактерии могут закрепляться на любой поверхности. Их адгезия может происходить избирательно, а также неизбирательно, на отрицательно или

положительно заряженных, на гидрофильных и гидрофобных поверхностях самыми различными способами, начиная с прикрепления с помощью липкости их слизистой капсулы и заканчивая прикреплением благодаря электростатическим силам. Их данный механизм прикрепления чрезвычайно сложен и заложен генетически. За этот механизм ответственными являются плазмиды.

Но наличие микроорганизмов на сульфидах не является стопроцентным доказательством их участия в окислении их поверхности, так как они закрепляются даже на таких поверхностях, которые не используют в качестве субстрата. Адгезия на поверхности сульфидных минералов имеет глубокий биологический смысл, так как минерал может являться источником энергии и жизнедеятельности, и носит специфический характер. Бактерии при выщелачивании закрепляются на поверхности сульфидов имеются и в жидкой фазе пульпы, где они окисляют элементную серу и закисное железо. Окислительная активность биомассы и на твердой, и в жидкой фазе дает понять роль микроорганизмов, которую они играют в этих фазах.

При анализе термодинамического состояния и электрохимических изменений арсенопирита, пирита и пирротина в процессе биовыщелачивания было подтверждено, что микроорганизмы окисляют кристаллическую решетку сульфидных минералов с помощью биокаталитических свойств их ферментов. При активном бактериальном выщелачивании они термодинамически неустойчивы и имеют достаточный запас свободной энергии, которая обеспечивает жизнедеятельность бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*, а также участвуют в реакциях с тепловым эффектом не менее 12 ккал.

В процессе биовыщелачивания арсенопирита окисное железо накапливается и в растворе, и в осадке. Его увеличение концентрации обуславливается биоокислением закисного железа, которое образуется при окислении арсенопирита:



При биовыщелачивании арсенопирита кислотность среды ниже, чем при осаждении железа в виде гидроксида из сернокислотных растворов. Поэтому при определенной концентрации сернокислого окисного железа оно гидролизует с выделением гидроксида, который выпадает в осадок и подкисляет среду:



Так же окисное железо может вступать в реакцию с мышьяком, образуя арсенаты железа, которые тоже выпадают в осадок, но это происходит при более низком рН среды, чем при осаждении железа.

В осадке железо чаще всего находится в трехвалентной форме. Мышьяк при биовыщелачивании арсенопирита переходит в раствор и осадок в трехвалентной и пятивалентной форме. Количество мышьяка зависит валентности и концентрации в растворе железа и мышьяка, а также от рН раствора.

В процессе биовыщелачивания можно заметить более четкую зависимость между рН раствора и количеством мышьяка. В первое время биовыщелачивания количество мышьяка уменьшается в осадке с увеличением кислотности, и, если рН меньше 1,6, то практически весь мышьяк находится в растворенной форме. Но далее в пульпе начинает увеличиваться количество мышьяка и органических веществ и увеличивается кислотность. Также копируются промежуточные соединения серы, но к концу выщелачивания их содержание уменьшается за счет окисления до сульфат-ионов.

Таким образом, в процессе взаимодействия поверхности сульфидов с микроорганизмами образуются твердые продукты окисления сульфидных минералов – закисное железо и элементная сера, которые в дальнейшем окисляются микроорганизмами в растворе и на поверхности минерала.

### **3. Технологические исследования**

Исследования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* сосредоточены на их способности окислять сульфидные минералы и экстрагировать металлы из руд. Эти исследования охватывают разнообразные аспекты, включая биохимические механизмы, генетические особенности, оптимальные условия культивирования и применение в промышленности.

#### **3.1 Технология выщелачивания сульфидных минералов**

АО "БАСТ" использует биотехнологические методы для выщелачивания сульфидных минералов, в основе которых лежит деятельность бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Эти методы позволяют эффективно извлекать

металлы, такие как медь, цинк и уран, из руд с низким содержанием полезных компонентов. Процесс включает несколько ключевых этапов и специфических условий, необходимых для максимальной эффективности.

1) Подготовка руды: включает измельчение и классификацию материала до оптимального размера частиц для обеспечения максимальной площади контакта между рудой и бактериями.

- Измельчение: Руда измельчается до частиц размером от 0.1 до 1 мм.
- Классификация: Полученный материал классифицируется для удаления крупных частиц, которые могут затруднять процесс выщелачивания.

2) Приготовление питательной среды: используется специально подготовленная питательная среда, содержащая необходимые минеральные компоненты.

- Состав среды:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{FeSO}_4$ .
- Стерилизация: Среда стерилизуется для предотвращения контаминации другими микроорганизмами.

3) Инокуляция и начальное культивирование: для активизации микробной массы.

- Инокуляция: Бактерии вводятся в питательную среду и инкубируются при температуре около  $30^\circ\text{C}$  и pH около 2.0.
- Аэрация: обеспечивается постоянная аэрация для поддержания необходимого уровня кислорода.

4) Выщелачивание в биореакторах: Основной этап процесса выщелачивания проводится в специально оборудованных биореакторах, где осуществляется контроль всех параметров.

- Температура: поддерживается в диапазоне  $28-35^\circ\text{C}$ .
- pH: поддерживается на уровне 1,5–2,5.
- Аэрация и перемешивание: обеспечиваются для равномерного распределения кислорода и субстратов.

• Время обработки: Процесс выщелачивания может занимать от нескольких дней до нескольких недель, в зависимости от типа руды и содержания металлов.

5) Мониторинг и контроль: на протяжении всего процесса осуществляется регулярный мониторинг ключевых параметров для обеспечения оптимальных условий для бактерий.

- Контроль pH и температуры: Автоматические датчики.

- Измерение концентраций  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ : Химический анализ для оценки активности бактерий.

- Отбор проб: Регулярный отбор проб для анализа концентрации металлов в растворе.

б) Сбор и переработка растворов: после завершения выщелачивания растворы, содержащие металлы, собираются для дальнейшей переработки и извлечения целевых компонентов.

- Осаждение и фильтрация: Металлы осаждаются химическими реагентами и отделяются фильтрацией.

- Дополнительная очистка: Проведение дополнительных стадий очистки для получения высокочистых металлов.

7) Обработка отходов: Остатки после выщелачивания обрабатываются для минимизации воздействия на окружающую среду.

- Нейтрализация: Остаточные растворы нейтрализуются для предотвращения кислотного дренажа.

- Рециркуляция: Часть обработанных растворов может быть повторно использована в процессе выщелачивания.

### 3.2 Оптимальные параметры процесса

Оптимальные параметры бактериального выщелачивания с использованием *Acidithiobacillus ferrooxidans* включают контроль температуры, pH, концентрации кислорода, питательных веществ и других условий, способствующих эффективному росту и метаболической активности бактерий. Эти параметры важны для максимизации скорости окисления сульфидных минералов и, следовательно, повышения эффективности процесса выщелачивания.

*Таблица 3.2.1 – оптимальное значение параметров бактериального выщелачивания с использованием бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* и их описание*

| № | Параметр    | Описание   | Значение параметра              |
|---|-------------|--|---------------------------------|
| 1 | Температура | Температура является критическим фактором для роста и активности | • Диапазон температур: 28-35°C. |

|   |                        |  |  |
|---|------------------------|--|--|
|   |                        | <p>Acidithiobacillus ferrooxidans, так как они являются мезофилами.</p> <p>При температуре ниже 20°C активность бактерий значительно снижается, что замедляет процесс выщелачивания. Слишком высокие температуры (выше 40°C) могут быть губительными для бактерий и также приводят к снижению их активности.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Оптимальная температура: около 30°C.</li> </ul>   |
| 2 | рН среды               | <p>A.ferrooxidans являются ацидофильными бактериями, и их оптимальная активность наблюдается в сильно кислой среде.</p> <p>Поддержание кислотности на этом уровне важно для предотвращения образования нерастворимых гидроксидов железа и других металлов, которые могут ингибировать процесс выщелачивания.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Диапазон рН: 1,5–3,5.</li> <li>• Оптимальный рН: около 2,0</li> </ul>   |
| 3 | Концентрация кислорода | <p>Кислород необходим для окисления железа (II) до железа (III), которое играет ключевую роль в окислении сульфидов</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Концентрация растворенного кислорода: не менее 2 мг/л.</li> <li>• Методы аэрации: использование аэрационных устройств или механическое перемешивание для обеспечения равномерного распределения кислорода в растворе</li> </ul> |

|   |                                  |   |   |
|---|----------------------------------|---|---|
| 4 | Концентрация железа (II)         | <p>Концентрация ионов железа (II) в растворе должна быть тщательно контролируема, так как они являются основным источником энергии для <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>.</p> <p>Высокая концентрация <math>Fe^{2+}</math> стимулирует рост бактерий и ускоряет процесс окисления, но чрезмерно высокие концентрации могут привести к токсичности и ингибировать активность бактерий.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Оптимальная концентрация <math>Fe^{2+}</math>: 5–10 г/л.</li> </ul>  |
| 5 | Наличие питательных веществ      | <p>Для поддержания активности и роста <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> необходимы определенные питательные вещества и микроэлементы.</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Азотные соединения: <math>(NH_4)_2SO_4</math> или другие источники аммония.</li> <li>• Фосфаты: <math>K_2HPO_4</math> как источник фосфора.</li> <li>• Минеральные соли: <math>MgSO_4</math>, <math>CaCl_2</math> и другие, необходимые для клеточных функций</li> </ul> |
| 6 | Ионная сила и концентрация ионов | <p>Концентрация ионов в растворе также влияет на активность бактерий</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ионная сила: поддержание оптимальной ионной силы раствора для предотвращения осаждения и образования ингибирующих соединений.</li> <li>• Токсичность металлов: контроль концентраций токсичных ионов, таких как медь или</li> </ul>                                      |

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  | цинк, которые могут ингибировать рост бактерий |
|--|--|--|--|

#### 4. Экономическая часть

Преимуществом использования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов является экономическая эффективность, так как биотехнологический процесс требует меньших затрат на реагенты и энергию, что снижает общую стоимость извлечения металлов, также есть возможность переработки руд с низким содержанием металлов, которые ранее считались непригодными для промышленного использования, позволяет увеличить объемы добычи и рентабельность производства.

Экономическая часть дипломной работы посвящена общему описанию финансово-экономических показателей и эффективности деятельности АО "БАСТ" при бактериальном выщелачивании (таблица 4.1)

Годовая производительность карьера составляет 500 тыс. тонн руды в год без учёта потерь и разубоживания

*Таблица 4.1 – Описание общих экономических показателей*

|   |                                       |                          |  |
|---|---------------------------------------|--------------------------|--|
| 1 | Анализ текущих финансовых показателей | Доходы и расходы         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Основные источники доходов: продажа обогащенной руды, побочные продукты производства.</li> <li>Основные статьи расходов: затраты на добычу, обогащение, транспортировку, персонал, энергетические ресурсы и материалы.</li> </ul> |
|   |                                       | Прибыль и рентабельность | <ul style="list-style-type: none"> <li>Валовая прибыль: разница между доходами и себестоимостью продукции.</li> <li>Чистая прибыль: валовая прибыль за вычетом операционных и прочих расходов.</li> </ul>  |

|   |                                       |  |  |
|---|---------------------------------------|--|--|
|   |                                       |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Показатели рентабельности: рентабельность продаж, активов, собственного капитала.</li> </ul>  |
| 2 | Затратная часть                       | Структура затрат                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Переменные затраты: сырье и материалы, электроэнергия, заработная плата производственного персонала.</li> <li>Постоянные затраты: амортизация оборудования, аренда, административные расходы.</li> </ul>            |
|   |                                       | Анализ затрат на бактериальное выщелачивание | <ul style="list-style-type: none"> <li>Стоимость микроорганизмов и реагентов.</li> <li>Затраты на поддержание оптимальных условий для микроорганизмов.</li> <li>Энергозатраты на процесс выщелачивания.</li> <li>Затраты на утилизацию отходов.</li> </ul> |
| 3 | Финансовый анализ                     | Баланс предприятия                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Активы: оборотные и внеоборотные активы.</li> <li>Пассивы: краткосрочные и долгосрочные обязательства, собственный капитал.</li> </ul>  |
|   |                                       | Отчет о прибылях и убытках                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Доходы от основной деятельности.</li> <li>Операционные расходы.</li> <li>Прочие доходы и расходы.</li> </ul>  |
|   |                                       | Коэффициенты ликвидности                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Текущая ликвидность.</li> <li>Быстрая ликвидность.</li> <li>Абсолютная ликвидность.</li> </ul>  |
| 4 | Экономическая эффективность внедрения | Преимущества метода                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Снижение затрат на переработку руды.</li> <li>Увеличение выхода металлов.</li> </ul>  |

|   |                                |   |  |
|---|--------------------------------|---|--|
|   | бактериального выщелачивания   |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Снижение экологической нагрузки.</li> </ul>   |
|   |                                | Сравнительный анализ с традиционными методами | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Сравнение затрат на переработку.</li> <li>• Сравнение выхода продукции.</li> <li>• Оценка сроков окупаемости инвестиций.</li> </ul>   |
|   |                                | Показатели экономической эффективности        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Чистый приведенный доход (NPV).</li> <li>• Внутренняя норма доходности (IRR).</li> <li>• Индекс прибыльности (PI).</li> <li>• Срок окупаемости (PBP).</li> </ul>  |
| 5 | Риски и меры по их минимизации | Виды рисков                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Технологические риски: отказ оборудования, снижение активности микроорганизмов.</li> <li>• Экономические риски: колебания цен на металлы, изменение налогового законодательства.</li> <li>• Экологические риски: нарушение экологических норм, штрафы.</li> </ul> |
|   |                                | Меры по минимизации рисков                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Внедрение системы управления рисками.</li> <li>• Страхование производственных рисков.</li> <li>• Создание резервного фонда.</li> </ul>  |

Экономическая часть дипломной работы подчеркивает важность комплексного подхода к анализу финансово-экономических показателей и эффективности деятельности предприятия. Внедрение бактериального выщелачивания позволяет АО "БАСТ" оптимизировать затраты, увеличить выход

продукции и снизить экологическую нагрузку, что в итоге повышает конкурентоспособность и устойчивость предприятия на рынке.

## **5. Экологическая часть**

Бактериальное выщелачивание обладает рядом экологических преимуществ перед традиционными методами добычи и переработки руд. Оно позволяет снизить использование агрессивных химических реагентов и уменьшить выбросы вредных веществ в окружающую среду. Но применение *Acidithiobacillus ferrooxidans* также связано с некоторыми экологическими рисками, которые включают возможность загрязнения подземных вод и необходимость управления отходами, содержащими тяжелые металлы.

В 2022 году была составлена и утверждена программа производственного экологического контроля деятельности АО «БАСТ» на 2023–2024 гг.

Цели программы:

- 1) Получение информации внутренней экологической политики, контроля, регулирование производственных процессов, которые потенциально оказывают воздействие на окружающую среду;
- 2) Обеспечение соблюдения требований экологического законодательства РК;
- 3) Снижение негативного воздействия производственных процессов на окружающую среду, жизнь и здоровье людей;
- 4) Использовать энергетические и природные ресурсы максимально эффективно;
- 5) Оперативное реагирование на нештатные ситуации;
- 6) Повышение уровня экологической ответственности и информированности работников;
- 7) Оповещение общественности об экологической деятельности компании;
- 8) Повышение эффективности экологического менеджмента.

Ответственным лицом за охрану окружающей среды месторождения Максут на предприятии АО «БАСТ» является Белецкая Л.А.

Внутренние проверки и процедуры устранения нарушений экологического законодательства на территории предприятия проводят 2 раза в месяц.

Таблица 5.1 – Источники загрязняющих выбросов АО «БАСТ»  
(мониторинг осуществляется расчетным методом)

| Территория          | Процессы                                  | Загрязняющие вещества   | Примечания   |
|---------------------|---|---|--|
| 1                   | 2   | 3   | 4  |
| Склады хранения ППС | Снятие, погрузка, хранение ППС            | Неорганическая пыль с двуокисью кремния   | ППС – потенциально плодородный слой почвы  |
| Скважины            | Буровые работы двумя буровыми станками    | Неорганическая пыль с двуокисью кремния   | Пылеподавление путем автоматизированной подачи воздушно-водяной смеси в забой скважины |
|                     | Сжиганием топлива двумя буровыми станками | Сажа, диоксид азота, оксид азота, оксид углерода, диоксид серы, алканы, формальдегид и другие |  |
|                     | Вторичное дробление негабаритных кусков   | Неорганическая пыль с двуокисью кремния   |  |
|                     | Взрывные работы                           | Неорганическая пыль с двуокисью кремния, диоксид азота, оксид азота, оксид углерода           | Перед взрывными работами поверхность территории орошается поливочными машинами         |

|              |   |  |  |
|--------------|---|--|--|
|              | Выемочно-погрузочные работы по руде             | Выбросы пыли руды, оксид алюминия, оксиды железа (II, III), оксид кальция, оксид магния, сульфит меди (II), сульфат никеля (II), неорганическая пыль с двуокисью кремния, взвешенные частицы | Пылеподавление с помощью поливооросительной машины |
|              | Выемочно-погрузочные работы по вскрышной породе | Неорганическая пыль с двуокисью кремния  | Пылеподавление с помощью поливооросительной машины |
|              | Разгрузочные работы на отвалах вскрышных пород  | Неорганическая пыль с двуокисью кремния  | Пылеподавление с помощью поливооросительной машины |
| Рудный склад | Разгрузочные работы на рудном складе            | Выбросы пыли руды, оксид алюминия, оксиды железа (II, III), оксид кальция, оксид магния, сульфит меди (II), сульфат никеля (II), неорганическая пыль с                                       | Пылеподавление с помощью поливооросительной машины |

|                         |                                      |   |   |
|-------------------------|--------------------------------------|---|---|
|                         |                                      | двуокисью кремния, взвешенные частицы   |   |
| Скважины, рудный склад  | Погрузочно-разгрузочные работы       | Диоксид азота (IV), оксид азота (II), сажа, чёрный углерод, оксид углерода, угарный газ, керосин  | Выбросы от двигателей бульдозеров и экскаваторов не нормируются |
| Скважины                | Бульдозерные работы на отвалах       | Неорганическая пыль с двуокисью кремния   |   |
| Рудный склад            | Бульдозерные работы на рудном складе | Оксид алюминия, оксиды железа (II, III), оксид кальция, оксид магния, сульфит меди (II), сульфат никеля (II), неорганическая пыль с двуокисью кремния, взвешенные частицы |   |
| Скважины – рудный склад | Автотранспортные работы              | Неорганическая пыль с двуокисью кремния   | Выбросы от двигателей автосамосвалов не нормируются             |

|                                  |  |   |  |
|----------------------------------|--|---|--|
| Скважины                         | Эксплуатационно-разведочные бурения                          | Неорганическая пыль с двуокисью кремния   |  |
| Отвалы вскрышных пород           | Сдувание пыли с поверхности отвалов                          | Неорганическая пыль с двуокисью кремния   | Пылеподавление 2 раза в день в теплое время года             |
| Рудный склад                     | Сдувание пыли с рудного склада (имеется пылеподавление)      | Оксид алюминия, оксиды железа (II, III), оксид кальция, оксид магния, сульфит меди (II), сульфат никеля (II), неорганическая пыль с двуокисью кремния, взвешенные частицы |  |
| Карьер                           | Заправка автотранспорта                                      | Предельные углеводороды, сероводород  |  |
| Вахтовый поселок: тепловой пункт | Сжигание топлива (угля) для теплоснабжения вахтового посёлка | Диоксид азота (IV), оксид азота (II), оксид углерода, диоксид серы, неорганическая пыль с двуокисью кремния   | Годовое образование шлака при сжигании топлива – 9,729 т/год |

|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| Вахтовый поселок: склад угля (для теплового пункта) | Сдувание пыли при хранении угля   | Неорганическая пыль с двуокисью кремния   |  |
| Вахтовый поселок (тепловой пункт) – отвал шлака     | Погрузка/разгрузка а шлака, сдувание пыли с поверхности отвала                                      | Неорганическая пыль с двуокисью кремния   | От сжигания угля в тепловом пугкте в котле образуется шлак   |
| Дробильно-сортировочный комплекс                    | Выгрузка руды, первичное дробление, первичное грохочение, вторичное дробление, вторичное грохочение | Оксид алюминия, оксиды железа (II, III), оксид кальция, оксид магния, сульфит меди (II), сульфат никеля (II), неорганическая пыль с двуокисью кремния, взвешенные частицы |  |
| Цех по обогащению руды: дробильное отделение        | Пересыпка руды  | Пыль руды с содержанием оксида алюминия, железа (II, III), кальция, магния, сульфит меди (II), сульфат никеля (II), взвешенные  | Для пылеподавления установлена пылеулавливающая установка – циклон СДК-ЦН-33–400, КПД очистки 86,3%. |

|  |   |    |   |   |
|--|---|----|---|---|
|  |   |    | частицы, двуокись кремния в составе неорганической пыли.        |   |
| Цех обогащению руды: обогатительное отделение            | по Флотационное обогащение медно-никелевой руды |    | Взвешенные частицы, сероуглерод, сероводород                    | Выбросы загрязняющих соединений происходит через дефлектор                              |
| Цех обогащению руды: реагентное отделение                | по Приготовление растворов реагентов            |    | Оксид кальция, сероуглерод, сероводород                         |   |
| Цех обогащению руды: дозировочная площадка               | по Дозировка растворов                          |    | Сероуглерод, сероводород  | Выбросы загрязняющих соединений происходит через трубу вентиляционной системы           |
| Цех обогащению руды: лаборатория (аналитический отдел)   | по Анализ на спектрометре                       | на | Серная кислота, соляная кислота, хлорид водорода, диоксид азота | Выбросы загрязняющих соединений происходит с помощью канального вентилятора через трубу |
| Цех обогащению руды: лаборатория (отдел подготовки проб) | по Разложение проб и концентратов в печи        | в  | Серная кислота, соляная кислота, хлорид                         | Выбросы загрязняющих соединений происходит с помощью                                    |

|   |   |  |   |  |
|---|---|--|---|--|
|   |   |  | водорода,<br>диоксид азота  | вентилятора через<br>сечение   |
| Цех по<br>обогащению<br>руды:<br>лаборатория<br>(отдел для<br>проведения<br>опытов) | Испытание проб  |  |   | При испытаниях<br>проб выбросы<br>загрязняющих<br>соединений не<br>происходит в связи с<br>малыми объёмами<br>проводимых работ и<br>концентрация<br>растворов мала |
| Цех по<br>обогащению<br>руды:<br>лаборатория<br>(отдел<br>технического<br>контроля) | Дробление проб  |  | Взвешенные<br>частицы   | Выбросы<br>загрязняющих<br>соединений<br>происходит с<br>помощью<br>вентилятора через<br>сечение   |
|   | Сушка проб  |  |   | В процессе сушки<br>проб загрязняющие<br>соединения не<br>выделяются в<br>атмосферу  |
| Цех по<br>обогащению<br>руды: две<br>дизельные<br>электростанции                    | Сжигание<br>дизельного<br>топлива во время<br>отключения<br>электроэнергии<br>(резервное<br>электропитание<br>) |  | Сажа, диоксид<br>азота, оксид<br>азота, оксид<br>углерода,<br>диоксид серы,<br>алканы,<br>формальдегид и<br>другие. | Выбросы<br>загрязняющих<br>соединений<br>происходит через<br>трубу   |
| Цех по<br>обогащению<br>руды: склад<br>готовой<br>продукции                         | Хранение готовой<br>продукции   |  |   | Не является<br>источником выброса<br>вредных<br>соединений   |

|   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| Цех по обогащению руды: модульная котельная                             | Теплоснабжение помещений цеха путем сжигания угля в двух водогрейных установках | Оксид азота (II), диоксид азота (IV), оксид углерода, диоксид серы, неорганическая пыль с содержанием двуокиси кремния | Выбросы загрязняющих соединений происходит через трубу |
| Цех по обогащению руды: открытый склад угля рядом с модульной котельной | Хранение пылящих материалов (угля)  | Неорганическая пыль с двуокисью кремния  |  |
| Цех по обогащению руды: площадка для временного хранения золы           | Переработка и хранение пылящих материалов                                       | Неорганическая пыль с двуокисью кремния  | Количество образующейся золы – 107,588 т/год           |
| Цех по обогащению руды: стояночный бокс                                 | Въезд/выезд, перемещение автотранспорта по территории предприятия               | Сажа, оксид азота, диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, малосернистый и нефтяной бензин, керосин               | Выбросы из двигателей автотранспорта не нормируются    |
| Цех по обогащению руды: ремонтно-механический цех                       | Механическая обработка металла  | Абразивная пыль, взвешенные частицы  |  |
|   | Сварочные работы  | Неорганическая пыль с  |  |

|  |  |   |   |
|--|--|---|---|
|  |  | <p>двуокисью кремния, пентаоксид ванадия, оксиды железа (II, III), оксид марганца (IV), оксид меди (II), оксид хрома (VI), диоксид азота (IV), оксид углерода, плохо растворимые неорганические фториды</p> |   |
|  | Газорезательные работы                     | <p>Оксиды железа (II, III), оксид марганца (IV), диоксид азота (IV), оксид углерода</p>   |   |
| Цех по обогащению руды: заправка около стояночного бокса | Заправка автотранспорта                    | <p>Сероводород, предельные углеводороды</p>   | <p>Выбросы загрязняющих соединений происходит через трубу</p> |
| Аналитическая лаборатория: дизель-генератор              | Электроснабжение аналитической лаборатории | <p>Алканы, оксид азота, диоксид азота, оксид углерода, диоксид серы, пропеналь, формальдегид</p>  | <p>Выбросы загрязняющих соединений происходит через трубу</p> |

|   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| Аналитическая лаборатория: дробильное отделение                           | Работа двух дробилок и двух истирательно-кольцевых мельниц   | Пыль  |  |
| Аналитическая лаборатория: испытательная химико-аналитическая лаборатория | Работа оборудования (вытяжные шкафы, шкафы для хранения растворов реагентов, моечная лабораторной посуды, место переливания реагентов, атомно-абсорбционный спектрометр) | Пары серной, соляной, азотной кислот, метилбензол | Оборудована местными отводами и вытяжной системой                                  |
| Хвостохранилище   |  |   | Нормативы загрязняющих веществ при эксплуатации хвостохранилища не устанавливаются |

## 5.1 Техника безопасности

Бактериальное выщелачивание, несмотря на свои преимущества, требует строгого соблюдения техники безопасности из-за риска воздействия патогенных микроорганизмов, химических реактивов и других факторов. В АО "БАСТ" разработан и внедрен ряд мер для обеспечения безопасности при проведении данного процесса. Рассмотрим основные правила техники безопасности, которые соблюдаются в компании.

### 1) Подготовка и обучение персонала

— Обучение и сертификация: Все сотрудники, участвующие в процессе бактериального выщелачивания, проходят обязательное обучение и сертификацию по технике безопасности.

— Инструктажи по охране труда: Регулярное проведение инструктажей по охране труда, включая вводный, первичный, повторный, внеплановый и целевой инструктажи.

— Знание аварийных процедур: Персонал должен быть ознакомлен с планами действий в случае аварийных ситуаций, включая эвакуацию и оказание первой помощи.

### 2) Личная защита работников

— Использование средств индивидуальной защиты:

- Защитные комбинезоны
- Респираторы или маски
- Защитные перчатки
- Защитные очки или щитки
- Специальная обувь

— Регулярная проверка средств индивидуальной защиты: Регулярная проверка состояния и исправности средств индивидуальной защиты.

### 3) Контроль и соблюдение санитарных норм

— Гигиена рабочего места: Ежедневная уборка и дезинфекция рабочих мест и оборудования.

— Личная гигиена: Обязательное мытье рук после работы с реагентами и микроорганизмами, использование антисептиков.

— Контроль здоровья сотрудников: Регулярные медицинские осмотры работников для предотвращения распространения инфекций.

### 4) Обеспечение безопасности при работе с химическими реагентами

— Правильное хранение и использование: Хранение химических реагентов в специально отведенных местах, с соблюдением всех предписанных условий (температура, влажность и т. д.).

— Маркировка и инструкции: Все химические вещества должны быть правильно маркированы, с указанием опасностей и мер предосторожности.

— Обеспечение вентиляции: Работа в хорошо проветриваемых помещениях или использование вытяжных систем.

#### 5) Обращение с микроорганизмами

— Использование безопасных штаммов: Применение штаммов микроорганизмов, проверенных на отсутствие патогенных свойств.

— Биологическая безопасность: Соблюдение биологических барьеров для предотвращения выхода микроорганизмов за пределы лаборатории или производственной площадки.

— Утилизация отходов: Безопасная утилизация биологических отходов, включая стерилизацию и дезинфекцию.

#### б) Аварийные ситуации и первая помощь

— Планы эвакуации: Разработка и регулярное обновление планов эвакуации.

— Аварийные комплекты: Наличие аварийных комплектов первой помощи и противопожарного оборудования.

— Тренировки по эвакуации: Регулярные тренировки по эвакуации и оказанию первой помощи.

Соблюдение вышеуказанных правил техники безопасности позволяет АО "БАСТ" минимизировать риски, связанные с бактериальным выщелачиванием, и обеспечивать безопасность своих сотрудников. Соблюдение этих мер не только защищает работников, но и способствует эффективному и безопасному производственному процессу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дипломная работа на тему "Использование бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов" посвящена изучению и анализу биотехнологических методов извлечения металлов из сульфидных руд. Проведенный анализ исследований подтверждает высокую эффективность и перспективность использования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* в процессах биовыщелачивания.

Можно выделить следующие преимущества метода:

1) Экологическая безопасность: использование *A.ferrooxidans* позволяет значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с традиционными методами химического выщелачивания, которые часто требуют применения токсичных реагентов. Бактериальное выщелачивание приводит к снижению уровня выбросов вредных веществ и улучшению условий труда на горнодобывающих предприятиях.

2) Экономическая эффективность: биотехнологический процесс требует меньших затрат на реагенты и энергию, что снижает общую стоимость извлечения металлов. Возможность переработки руд с низким содержанием металлов, которые ранее считались непригодными для промышленного использования, позволяет увеличить объемы добычи и рентабельность производства.

3) Простота масштабирования: технология биовыщелачивания легко масштабируется, что позволяет применять её как в лабораторных условиях, так и в промышленных масштабах. Использование биореакторов и других специализированных устройств обеспечивает гибкость и адаптивность процесса к различным условиям эксплуатации.

Также данный метод имеет и недостатки:

1) Время процесса: процесс бактериального выщелачивания занимает больше времени по сравнению с химическими методами. Продолжительность процесса может варьироваться от нескольких недель до нескольких месяцев в зависимости от типа руды и условий выщелачивания

2) Требования к условиям культивирования: поддержание оптимальных условий для роста и активности бактерий требует точного контроля параметров, таких как температура, рН, концентрация кислорода и питательных веществ. Необходимость постоянного мониторинга и регулирования условий культивирования может увеличивать операционные затраты и сложность управления процессом.

3) Чувствительность к токсичным элементам: присутствие в руде высоких концентраций токсичных элементов, таких как медь или цинк, может ингибировать рост и активность бактерий, что снижает эффективность процесса. Требуется разработка дополнительных мер по адаптации бактерий к таким условиям или предварительная очистка руды

Перспективы использования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* в промышленности включают развитие новых и улучшение существующих технологий биовыщелачивания. Будущие исследования и инновации могут способствовать повышению эффективности и скорости процесса, а также расширению его применения на различные виды руд и отходов. Кроме того, возможности генной инженерии и биотехнологий открывают пути для создания более устойчивых и продуктивных штаммов бактерий, что еще больше увеличит конкурентоспособность биовыщелачивания на мировом рынке.

Таким образом, использование *Acidithiobacillus ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов представляет собой многообещающий метод, который сочетает экологическую безопасность, экономическую эффективность и технологическую гибкость, несмотря на существующие ограничения. Развитие и оптимизация этой технологии могут значительно улучшить процессы добычи и переработки металлов, способствуя устойчивому развитию горнодобывающей промышленности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДВУХСТАДИЙНОЕ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ СУЛЬФИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ЗОЛОТА И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ Фомченко Наталья Викторовна.
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ СУЛЬФИДОВ В ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДАХ И ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДУКТОВ ОКИСЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ НА ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ – МАКАРОВ Дмитрий Викторович.
3. Brock biology of microorganisms / Michael T. Madigan . . . [et al.].—13th ed.
4. «Технология бактериального выщелачивания» 2014 г. – Турысбекова Г.С., Бектай Е.К.
5. Статья «Сульфидные руды» – компания ООО «Техноаналитприбор».
6. Магистерская диссертация «Особенности формирования Cu-Ni рудной минерализации на месторождении Южный Максут» 2022 г. – Туғамбай Сымбат Шаралықызы.
7. Промышленность Казахстана. 2012. № 2 – Ю. С. Парилов.
8. Теоретические основы бактериального окисления и выщелачивания сульфидных минералов – доц. Абдурахманов Э.
9. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS В БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИИ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА. 2019 – Шаихова Д.Р.
10. Журнал «Биотехнология. Теория и практика. №4 2010» статья «Выделение и идентификация железooksисляющих бактерий рода Acidithiobacillus из рудных месторождений Акмолинской области» – авторы Г.М. Салхожаева, И.Е. Парамонова, Л.А. Нагуманова, К.А. Динкаева, Н.А. Талжанов, Д.С. Балпанов.
11. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды с вариациями питательной среды для хемолитотрофных микроорганизмов. 2015 – О.О. Левенец, Т.С. Хайнасова, А.А. Балыкова, Л.А. Позолотина.
12. Журнал «Вестник краунц. Науки о земле. 2008 № 2 выпуск № 12» статья «Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд» – Т.И. Кузякина, Т.С. Хайнасова, О.О. Левенец.
13. Программа производственного экологического контроля на 2023–2029 гг. АО «Баст».

14. "Microbial Processing of Metal Sulfides" (2001) — K. Bosecker.
15. "Geomicrobiology: Molecular and Environmental Perspective" (2006) — H.L. Ehrlich, D.K. Newman.
16. "Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes" (2007) — W. Rawlings, D.B. Johnson.
17. Иванов, А. А. Экономика предприятий цветной металлургии. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
18. Смирнов, В. И. Финансовый менеджмент в горнодобывающей промышленности. — СПб.: Политехника, 2020.
19. Экологический кодекс Республики Казахстан от 2 января 2021 года №400-VI ЗРК.
20. Иванов, А. А. Безопасность труда в биотехнологических процессах. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
21. Смирнов, В. И., и Козлова, Е. В. Технологии биовыщелачивания: методы и безопасность. — СПб.: Политехника, 2019.
22. Инструкции и методические рекомендации АО "БАСТ" по технике безопасности при бактериальном выщелачивании.

## РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Кенжембетова Карина Букенбаевна

6B05101 – Химическая и биохимическая инженерия

На тему: «Использование *A.Ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов»

Выполнено:

а) графическая часть на 6 листах

б) пояснительная записка на \_\_\_\_\_ страницах

### ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломная работа посвящена методам использования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов, на примере месторождения Южный Максут. Тема является актуальной в контексте современных требований к экологии и эффективности добычи полезных ископаемых. Данные методы в добыче металлов 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 биовыщелачивания, что подчеркивает новизну исследования. Работа имеет структуру, соответствующую требованиям: введение, литературный обзор, теоретическая часть, экономический анализ и разделы по технике безопасности и экологии. Введение описывает актуальность, цели и задачи исследования, научную новизну. Литературный обзор охватывает роль микроорганизмов в биовыщелачивании, механизмы их действия и применяемые технологии. В теоретической части подробно рассматриваются материалы и методы исследования, используемые на месторождении Южный Максут. 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 оценивается по рейтинговой системе \_\_\_\_\_

на 90 баллов, "отлично"

Рецензент  
Кандидат техн. наук  
  
Атанова О.В.  
«12» июля 2024 г.

  
Кандидат техн. наук  
Атанова О.В.  
расстояние / заверю  
Гылыми хатшы / Ученый секретарь  
«Металлургия және қан байыту институты» АҚ  
«12» 06 2024 ж. Байышев

**ОТЗЫВ**

**НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на Дипломную работу

Кенжембетова Карина Букенбаевна

6B05101 – Химическая и биохимическая инженерия

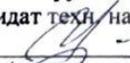
На тему: «Использование *A. Ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов»

Дипломная работа посвящена методам использования бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* для окисления сульфидных минералов, на примере месторождения Южный Максут. 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, теоретическую часть, экономический анализ и раздел экологии. Введение раскрывает актуальность темы, цели и задачи исследования, научную новизну. Литературный обзор содержит детальное рассмотрение роли *Acidithiobacillus Ferrooxidans* в процессах биовыщелачивания, механизмы их действия и технологии, применяемые для окисления сульфидных минералов. Теоретическая часть описывает материалы, а также анализирует методики, применяемые на месторождении Южный Максут. 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.

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

**Научный руководитель**

Кандидат техн. наук

 Турысбекова Г.С.

«»  2024 г.



## Metadane

Tytuł

**Использование A.ferrooxidans для окисления сульфидных минералов**

Autorzy

**Кенжембетова Карина Букенбаевна**

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 |  | 13 |
| Rozstrzelenia           |  | 0  |
| Mikrospacje             |  | 12 |
| Ukryte znaki            |  | 12 |
| Parafrazy               | <b>a</b>  | 72 |

## 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



**8479**  
Liczba słów



**67685**  
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  | <a href="https://bioclass.ru/wp-content/uploads/2022/01/dokshuk.doc">https://bioclass.ru/wp-content/uploads/2022/01/dokshuk.doc</a>   | 63                             | 0.74 % |
| 2  | <a href="https://bioclass.ru/wp-content/uploads/2022/01/dokshuk.doc">https://bioclass.ru/wp-content/uploads/2022/01/dokshuk.doc</a>   | 48                             | 0.57 % |
| 3  | <a href="https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniija-sulfidnyh-mineralov.html">https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniija-sulfidnyh-mineralov.html</a> | 40                             | 0.47 % |
| 4  | <a href="https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniija-sulfidnyh-mineralov.html">https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniija-sulfidnyh-mineralov.html</a> | 38                             | 0.45 % |
| 5  | <a href="https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniija-sulfidnyh-mineralov.html">https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniija-sulfidnyh-mineralov.html</a> | 34                             | 0.40 % |

|    |   |    |        |
|----|---|----|--------|
| 6  | <a href="https://ecoportal.kz/Public/PubHearings/LoadFile/48230">https://ecoportal.kz/Public/PubHearings/LoadFile/48230</a>   | 30 | 0.35 % |
| 7  | Особенности формирования су-пи рудной минерализации на месторождении Южный Максут<br>5/24/2022<br>Satbayev University (ИГиНГД)  | 27 | 0.32 % |
| 8  | <a href="https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniya-sulfidnyh-mineralov.html">https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniya-sulfidnyh-mineralov.html</a> | 20 | 0.24 % |
| 9  | <a href="https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniya-sulfidnyh-mineralov.html">https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniya-sulfidnyh-mineralov.html</a> | 19 | 0.22 % |
| 10 | Особенности формирования су-пи рудной минерализации на месторождении Южный Максут<br>5/24/2022<br>Satbayev University (ИГиНГД)  | 18 | 0.21 % |

#### z bazy RefBooks (0.00 %)

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

#### z bazy macierzystej (1.78 %)

| LP | TYTUŁ  | IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW) |        |
|----|--|--------------------------------|--------|
| 1  | Особенности формирования су-пи рудной минерализации на месторождении Южный Максут<br>5/24/2022<br>Satbayev University (ИГиНГД)   | 110 (7)                        | 1.30 % |
| 2  | Особенности формирования су-пи рудной минерализации на месторождении Южный Максут<br>5/25/2022<br>Satbayev University (ИГиНГД)   | 21 (2)                         | 0.25 % |
| 3  | Проект обогатительной фабрики по переработке медной руды месторождения Максут<br>производительностью 400тыс. тонн руды в год<br>5/11/2018<br>Satbayev University (Г_М_И)                   | 14 (1)                         | 0.17 % |
| 4  | Исследование биохимического способа выщелачивания золота из техногенного минерального сырья с использованием хемолитотрофных микроорганизмов<br>5/17/2017<br>Satbayev University (И_И_В_Т) | 6 (1)                          | 0.07 % |

#### z Programu Wymiany Baz (0.19 %)

| LP | TYTUŁ  | IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW) |        |
|----|--|--------------------------------|--------|
| 1  | Технология получения триптофана<br>4/15/2024<br>Kostanai State University A.Baitursynov (Кафедра продовольственной безопасности и биотехнологии) | 16 (2)                         | 0.19 % |

#### z Internetu (7.52 %)

| LP | ADRES URL ŹRÓDŁA  | IDENTYCZNYCH SŁÓW (FRAGMENTÓW) |        |
|----|---|--------------------------------|--------|
| 1  | <a href="https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniya-sulfidnyh-mineralov.html">https://studizba.com/lectures/inzhenerija/biotehnologicheskie-processy-v-metallurgii/35857-teoreticheskie-osnovy-bakterialnogo-okislenija-i-vyschelachivaniya-sulfidnyh-mineralov.html</a> | 268 (16)                       | 3.16 % |
| 2  | <a href="https://bioclass.ru/wp-content/uploads/2022/01/dokshuk.doc">https://bioclass.ru/wp-content/uploads/2022/01/dokshuk.doc</a>   | 175 (10)                       | 2.06 % |
| 3  | <a href="https://ecoportal.kz/Public/PubHearings/LoadFile/48230">https://ecoportal.kz/Public/PubHearings/LoadFile/48230</a>   | 42 (2)                         | 0.50 % |

|   |   |        |        |
|---|---|--------|--------|
| 4 | <a href="http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/106310/1/umk_rrobr.pdf">http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/106310/1/umk_rrobr.pdf</a>   | 38 (5) | 0.45 % |
| 5 | <a href="https://inkinesh.tecalideherrera.gob.mx/h2so4-feso4-hbro-h2o-fe2-so4-3-febr3/">https://inkinesh.tecalideherrera.gob.mx/h2so4-feso4-hbro-h2o-fe2-so4-3-febr3/</a>   | 33 (5) | 0.39 % |
| 6 | <a href="http://www.kscnet.ru/kraesc/2008/2008_12/art8.pdf">http://www.kscnet.ru/kraesc/2008/2008_12/art8.pdf</a>   | 31 (2) | 0.37 % |
| 7 | <a href="http://topuch.com/tajitdin-abdumalik-abdujamalli-bakterialenoe-vishelachivanie-m/index3.html">http://topuch.com/tajitdin-abdumalik-abdujamalli-bakterialenoe-vishelachivanie-m/index3.html</a>                     | 24 (2) | 0.28 % |
| 8 | <a href="https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/sciens/dissertacii/2018/dissertaciya_maksimova_1_1.pdf">https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/sciens/dissertacii/2018/dissertaciya_maksimova_1_1.pdf</a> | 15 (1) | 0.18 % |
| 9 | <a href="https://studopedia.info/1-28892.html">https://studopedia.info/1-28892.html</a>   | 12 (1) | 0.14 % |