

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

SATBAYEV UNIVERSITY

Институт металлургии и промышленной инженерии

Кафедра металлургии и обогащения полезных ископаемых

Тажитдин Абдумалик Абдужамалұлы

Бактериальное выщелачивание медьсодержащих хвостов

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

6M073700-Обогащение полезных ископаемых

Алматы 2020



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

SATBAYEV UNIVERSITY

Институт металлургии и промышленной инженерии

Кафедра металлургии и обогащения полезных ископаемых

6M073700- «Обогащение полезных ископаемых»

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующая кафедрой МиОПИ,  
Кандидат технических наук

\_\_\_\_\_ М.Б.Барменшинова

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской работы**

Магистранту: Тажитдин Абдумалик Абдужамалұлы

Тема: Бактериальное выщелачивание медьсодержащих хвостов

Утверждена приказом Ректора Университета №1182-М от «30»06.2020 г.

Исходные данные к дипломной работе: Медьсодержащие хвосты месторождение «Боргезсай»

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Введение. Литературный обзор;

б) Исследовательская часть;

в) Заключение;

г) Список использованной литературы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): представлены \_\_\_\_\_ слайдов презентации работы .

Рекомендуемая основная литература:


1. Турысбекова Г.С., Меретуков М.А., Бектай Е.К. Золото: Инновации в химии и металлургии. Алматы, 2015 г. 632 стр
2. Польшкин С. И., Адамов Э. В., Панин В. В. Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. М.: Недра, 1982. 286 с.

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Литературный обзор и обоснование направления магистерской диссертации	25.08.2018-20.05.2019	
Исследовательская работа	25.08.2019-29.03.2020	
Оформление магистерской диссертации	30.03.2020-05.07.2020	

**Подписи**

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата Подписания	Подпись
Теоретическая часть	Турысбекова Г.С. к.т.н., профессор	06.07.2020	
Исследовательская часть	Турысбекова Г.С. к.т.н., профессор	06.07.2020	
Нормоконтролер	Мотовилов И.Ю. Доктор PhD, ассистент профессор	06.07.2020	

Научный руководитель: \_\_\_\_\_ Турысбекова Г.С.

Задание принял к исполнению обучающийся: \_\_\_\_\_ Тажитдин А.А.

Дата \_\_\_\_\_ 06.07.2020 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН  
SATBAYEV UNIVERSITY

**ОТЗЫВ  
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на диссертацию магистранта Тажитдин Абдумалик Абдужамалұлы  
«Бактериальное выщелачивание медьсодержащих хвостов»  
представленной на соискание звания магистра  
по специальности 6M073700-Обогащение полезных ископаемых

Биотехнологии все шире применяются в мире для извлечения металлов из руд и концентратов, а также для переработки сырья хвостохранилищ. Данная работа направлена на изучение вопросов связанных с возможностью доизвлечения меди их медьсодержащих хвостов. Диссертация направлена на повышение технико-экономических показателей процесса биовыщелачивания медьсодержащих хвостов месторождения «Боргезсай» и «Старое». Исследования проведенные в данной работе показывают, что технология бактериального выщелачивания может использоваться для переработки таких хвостохранилищ. Тема и поставленные решаемые задачи исследований актуальны для развития практики в области биотехнологии металлов.

Соискателем проведен литературный обзор по методам бактериального выщелачивания, химизм и особенности протекания процессов при БВ. Также проведен анализ практики работы хвостохранилищ, их мониторинга и контроля, включая проблемы водоотведения.

Соискателем выполнены исследования связанные с проведением экспериментов бактериального выщелачивания проб хвостохранилища, которые показали возможность доизвлечения меди из хвостов данного типа. На основании этих исследований предложена технологическая схема использования бактериального выщелачивания при переработке медьсодержащих хвостов.

В результате выполненных автором исследований определены технологические параметры процесса и оптимальные условия для извлечения меди из хвостов.

Считаю, что представленная работа является законченной квалификационной работой, и отвечает требованиям предъявляемым к магистерским работам, а ее автор заслуживает звания магистра по специальности 6M073700-Обогащение полезных ископаемых.

Научный руководитель  
Кандидат технических наук, профессор \_\_\_\_\_ Г.С. Турысбекова  
05.07.2020 г.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН  
SATBAYEV UNIVERSITY**

**РЕЦЕНЗИЯ**

на магистерскую диссертацию  
Тажитдин Абдумалик Абдужамалұлы

на тему «Бактериальное выщелачивание медьсодержащих хвостов», представленную на соискание степени магистра по специальности 6M073700-Обогащение полезных ископаемых

выполнено:

- а) графическая часть (слайды презентации) на        листах
- б) пояснительная записка на        страницах

**ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ**

**1. Соответствие работы специальности и отрасли науки**

Представленная для рецензирования магистерская работа соответствует специальности 6M070900-Металлургия и посвящена исследованию на изучение вопросов, связанных с возможностью доизвлечения меди из медьсодержащих хвостов, а именно на повышение технико-экономических показателей процесса биовыщелачивания медьсодержащих хвостов месторождений «Боргезсай» и «Старое».

**2. Актуальность темы исследования и ее связь с общенаучными и общегосударственными программами (запросами практики и развития науки и техники)**

В связи с истощением богатых медных руд в медное производство вовлекаются все более бедные смешанные руды, отвалы и хвосты. Для переработки такого вида сырья широко применяются гидрометаллургические технологии, включающие процессы выщелачивание, жидкостная экстракция и электролиз.

Процесс выщелачивания хвостов может проводиться разными способами. Как показывает практика действующих предприятий биовыщелачивание все шире применяется в мире для извлечения металлов из упорных смешанных руд и концентратов, а также для переработки сырья хвостохранилищ. В РК пока такая технология к медьсодержащим рудам не применяется и разработка экономически эффективной биотехнологии является актуальной проблемой.

Избранная тема магистерской диссертации посвящена актуальной проблеме - изучению применения технологии бактериального выщелачивания медьсодержащих хвостов месторождения «Боргезсай» и «Старое».

**3. Степень обоснованности и достоверности каждого результата (научного положения), выводов и заключений, сформулированных в магистерской диссертации**

Выполненные магистрантом исследования показали, что использование бактериально-химического выщелачивания позволяет достигнуть извлечения меди из

исследуемых образцов свыше 80 % за 72 часа. Рекомендовано использование бактериального сернокислотного выщелачивания для интенсификации процесса.

Приведенные в магистерской диссертации результаты исследований, выводы и заключения достаточно обоснованы и достоверны, поскольку проведен обширный литературный обзор по изучению данной темы, в работе использованы современные методы физико-химических исследований и анализов, а также стандартные методы аналитической химии.

#### **4. Степень новизны каждого научного результата (положения), выводы и заключения, сформулированные в диссертации**

Научная новизна полученных результатов: установлены основные закономерности по биовыщелачиванию меди.

#### **Подтверждение достаточной полноты публикаций основных положений, результатов, выводов диссертации**

По теме опубликован 1 доклад в сборнике Международной конференции, материалы которых охватывают результаты исследовательской работы, соответствуют выводам диссертации и является вполне достаточным для соискателей академической степени – магистра технических наук по специальности «Металлургия».

#### **5. Замечания к работе**

По представленной для рецензирования работе имеются следующие замечания и пожелания:

1. не приведены спектрограммы физико-химического анализа;
2. не приведены основные графические зависимости параметров по биовыщелачиванию;
3. не приведены результаты изучения кинетики биовыщелачивания меди из образцов.

#### **Заключение и оценка работы**

Несмотря на указанные замечания и недостатки, считаю, что диссертационная работа Тажитдин Абдумалик Абдужамалұлы соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, и может быть оценена на «хорошо», 85%, а автор заслуживает присуждения ей академической степени магистра технических наук по специальности 6M070900-Металлургия.

#### **Рецензент**

Доктор Ph.D,

ассистент-профессор, Ph.D

НАО «КазНИТУ им.К.И.Сатпаева» К.К. Мамырбаева

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

## Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

**Автор:** Тажитдин Абдумалик

**Название:** Бактериальное выщелачивание медьсодержащих хвостов

**Координатор:** Гаухар Турысбекова

**Коэффициент подобия 1:** 15,8

**Коэффициент подобия 2:** 9,3

**Замена букв:** 5

**Интервалы:** 0

**Микропробелы:** 54

**Белые знаки:** 1978

**После анализа Отчета подобия констатирую следующее:**

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;



обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

06.07.2020 г.

*Дата*

\_\_\_\_\_  
*Подпись Научного руководителя*

## Протокол анализа Отчета подобия

### заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения

Заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения заявляет, что ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Тажитдин Абдумалик

Название: Бактериальное выщелачивание медьсодержащих хвостов

Координатор: Гаухар Турысбекова

Коэффициент подобия 1:15,8

Коэффициент подобия 2:9,3

Замена букв:5

Интервалы:0

Микропробелы:54

Белые знаки:1978

**После анализа отчета подобия заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения констатирует следующее:**

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, работа признается самостоятельной и допускается к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, работа не допускается к защите.

Обоснование:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

06.07.2020 г.

Барменшинова М.Б.

*Дата*

*Подпись заведующего кафедрой /  
начальника структурного подразделения*

**Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

06.07.2020 г.

Барменшинова М.Б.

*Дата*

*Подпись заведующего кафедрой / начальника  
структурного подразделения*

## АННОТАЦИЯ

В магистерской диссертации исследовалась обогатимость медьсодержащих хвостов полученных в результате переработки медных руд месторождения «Боргезсай» и «Старое», с содержанием меди в хвостах 0,15 – 0,2 %, с целью повышение извлечения меди до 80 % с помощью биокультур.

Выполнен литературный анализ характеристики медных месторождений РК и технологий переработки медьсодержащего сырья.

Обосновано выбранное направление магистерской диссертации. Исследованы гранулометрический, химический, минералогический состав медьсодержащих хвостов полученных в результате переработки медных руд месторождения «Боргезсай».

Разработана экономически выгодная и экологически чистая технологическая схема переработки медьсодержащих хвостов, с получением медных концентратов пригодных для получения меди и благородных металлов.

## АҢДАТПА

Бұл магистрлік диссертацияда құрамында «Боргезсай» және «Старое» кен орындарында мыс кендерін өңдеу нәтижесінде алынған құрамында 0,15 – 0,2% мыс бар қалдықтардың байытылуы зерттелді.

ҚР мыс кен орындарының сипаттамаларына және құрамында мыс бар шикізатты өңдеу технологияларына әдеби талдау жасалды.

Магистрлік диссертацияның таңдалған бағыты негізделген. «Боргезсай» кен орнының мыс кендерін өңдеу нәтижесінде алынған құрамында мыс бар қалдықтардың гранулометриялық, химиялық, минералогиялық құрамы зерттелді.

Мыс пен асыл металдарды өндіруге жарамды мыс концентраттарын ала отырып, құрамында мыс бар қалдықтарды өңдеудің экономикалық тиімді және экологиялық таза технологиялық схемасы әзірленді.

## ANNOTATION

The master's thesis investigated the enrichment of copper-containing tailings obtained from the processing of copper ores from The «Borgezsay» and «Staroe» deposits, with a copper content of 0.15 – 0.2% in the tailings, in order to increase the extraction of copper to 80 % using biocultures.

A literary analysis of the characteristics of copper deposits in the Republic of Kazakhstan and technologies for processing copper-containing raw materials is performed.

The chosen direction of the master's thesis is justified. The granulometric, chemical, and mineralogical composition of copper-containing tailings obtained as a result of processing of copper ores from the «Borgezsay» Deposit has been studied.

A cost-effective and environmentally friendly technological scheme for processing copper-containing tailings, with the production of copper concentrates suitable for the production of copper and precious metals, has been developed.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	17
1. Литературный обзор	19
1.1. Современное состояние практики переработки упорных руд и отходов горно-обогатительных предприятий на основе бактериального выщелачивания	19
1.2. Микроорганизмы, применяемые в промышленности	22
1.2.1 Силикатные бактерии	22
1.2.2 Тионовые бактерии	25
1.3. Температурные группы микроорганизмов	27
1.4. Распространенность микроорганизма <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> в рудах некоторых месторождений	28
1.5. Технология бактериального выщелачивания	29
1.6. Мировая практика промышленного использования микроорганизмов при переработке минерального сырья различного типа.	34
1.7. Выводы после исследования биовыщелачивания меди в литературных источниках	40
2. Технология переработки техногенных месторождений	41
2.1. Общие сведения о хвостовом хозяйстве	41
2.1.1. Отвалы некондиционных руд и вскрышных пород	41
2.1.2. Основные параметры хвостов ОФ:	42
2.1.3. Водоснабжение в т. ч. оборотное, водоподготовка:	42
2.2. Водоотведение	46
2.3. Подготовка хвостов к складированию	46
2.4. Утилизация бытовой и электрической техникой	48
2.5. Эксплуатация хвостохранилищ	49
2.5.1. Мониторинг безопасности хвостохранилища	49
2.5.2. Безопасность хвостохранилища	50
2.6. Образование техногенных месторождений и их классификация	52
2.6.1. Состав полезных компонентов и использование сырья	53
3. Исследовательская часть	56
3.1. Методика исследования и оценки техногенных месторождений	56
3.2. Подготовка пробы к исследованию	56
3.3. Проведение исследований	57
3.3.1 Перколяционное выщелачивание	57
3.3.2 Агитационное выщелачивание	58
3.4. Исследование бактериально-химического выщелачивания проб	58
3.5. Механизм окисления сульфидов металлов	59
3.6. Подготовка бактериального раствора	60
3.7. Методика проведения эксперимента	60

техногенных месторождений	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	63
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	64
Приложение А оттиски опубликованных статей	71



## ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия истощаются многие месторождения цветных металлов, расположенные в освоенных районах, в благоприятных горногеологических, климатических и транспортных условиях. Истощение минеральных ресурсов на этих объектах, возрастающая острота экономических и социальных проблем, ужесточение экологических требований и энергетические трудности последних лет требуют поиска новых технологических решений. Одним из современных способов переработки первичного и особенно забалансового сырья является биогеотехнология, использующая бактериально-химический механизм процессов окисления сульфидов и выщелачивания металлов из руд [66].

В настоящее время накопились значительные запасы лежалых хвостов хвостохранилища «Боргезсай» и «Старое». Запасы по хвостохранилищу оцениваются в количестве до 1 млрд тонн. Оценка проб показала что среднее содержание меди в хвостах составляет 0,15-0,2 %. Настоящая работа посвящена исследованию процесса выщелачивания медьсодержащих хвостов на примере отходов Боргезсайского месторождения.

**Актуальность работы.** Истощение богатых месторождений и рост доли трудно извлекаемых запасов, высокая себестоимость добычи и обработки требуют разработки новых эффективных, экономически выгодных методов добычи ценных металлов. В этом аспекте широкое применение находит инновационная биогеотехнология – биовыщелачивание ценных металлов с помощью хемолитотрофных микроорганизмов. Биологическое выщелачивание является одним из современных способов переработки руд. Оно основано на способности микроорганизмов окислять сульфидные минералы с высвобождением металлов в раствор. Перспективность разработок в этой области связана с увеличением глубины переработки руд, привлечением новых ранее не использовавшихся типов сырья, экологической безопасностью создаваемых технологий. Извлечение целевых компонентов в жидкую фазу позволяет значительно уменьшить газообразные и пылевые выбросы в атмосферу. Подобные инновационные технологии совершенствуются отечественными и зарубежными исследователями и используются для переработки медно-цинковых руд в странах латинской Америки, США, Австралии, Китая, Казахстана, России [10].

Отходы горнодобывающих предприятий являются техногенными объектами, которые в соответствии с существующим законодательством могут рассматриваться как потенциальный сырьевой ресурс. Однако такой вариант решения проблемы не вызывает интереса у коммерческих компаний из-за отсутствия дешевых и простых в исполнении способов их переработки. Поэтому испытание нетрадиционных способов вторичной переработки отходов обогащения и создание на их основе новых технологий являются актуальными задачами. Их решение позволит использовать экологичные микробиологические методы в горнорудной промышленности региона.

Биовыщелачиванием металлы могут быть извлечены из бедных руд без их предварительной добычи. Бактериальное выщелачивание не требует больших капитальных вложений, просто в исполнении и может быть с успехом применено для переработки некондиционных руд и промышленных отходов.

Особую опасность представляют старогодние флотационные отвалы и отвалы отработанных месторождений, где происходит разрушение рудных минералов на поверхности некондиционной руды и вскрышных пород. При окислении сульфидов образуются растворимые соли железа, цинка, меди, кадмия, свинца, сульфат ионы [5].

Рядом исследователей было показано, что сульфиды некоторых металлов (например, меди и цинка) активно окисляются трехвалентным железом. Технологии, основанные на выщелачивании сульфидов ионами  $Fe^{3+}$ , разработаны для пирротинового, медно-цинкового, золото-мышьякового, медного концентратов [39]. Рабочий раствор  $Fe^{3+}$  получают путем окисления ацидофильными железоокисляющими бактериями (как правило, мезофильными *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*) закисного железа в питательной среде Сильвермана-Люднгрена 9Ж [21]. При этом выщелачивание проводят при высоких температурах (50-80 °С), что ведет к неизбежной гибели бактерий.

**Цель работы.** Цель работы заключается в научном и техническом обосновании способов бактериально-химического выщелачивания как средства извлечения ценных компонентов из медьсодержащих отходов в мезофильных условиях.

**Научная новизна работы.** Выщелачивания медьсодержащих хвостов обеспечивается методом биовыщелачивания с использованием *Acidithiobacillus ferrooxidans*, при этом эффективность процесса определяется температурой, скоростью и кислотностью среды.

**Практическая значимость работы.** Выделены культуры бактерий, предназначенные для промышленного выщелачивания ценных компонентов из отходов флотационного обогащения.

Установлены оптимальные технологические параметры (температура, время контакта, концентрация реагента) для выщелачивания тионовыми бактериями окисления сульфида железа. Экологический, экономический и технический эффект.

## 1. Литературный обзор

### 1.1 Современное состояние практики переработки упорных руд и отходов горно-обогатительных предприятий на основе бактериального выщелачивания

Гидрометаллургическими называются процессы извлечения металлов из руд, концентратов, промежуточных продуктов и отходов металлургического производства, а также из вторичного сырья в водную фазу при их обработке водными растворами химических реагентов с последующим выделением из растворов металлов или их соединений.

Как известно, комплексность использования минерального сырья определяет эффективность и целесообразность промышленного производства в целом. Повышение степени извлечения компонентов из рудного и техногенного сырья в готовые продукты - одна из основных задач металлургии.

Рудное сырье содержит различные металлы. Повышение эффективности использования сырья ставит задачу извлечения всех составляющих, содержащихся в нем. В то же время содержание даже основного компонента в рудах цветных металлов редко превышает 1 %, а зачастую даже ниже. Таким образом, даже при относительно полном извлечении основных металлов используется только незначительная часть добываемого сырья, при этом без пользы извлекается из недр, дробится, измельчается огромное количество руды.

Руды, как правило, представляют собой многокомпонентное комплексное сырье, содержащее кроме основных металлов ряд сопутствующих элементов, извлечение которых отвечает требованиям комплексности использования сырья [14]. Не менее важным является то, что с развитием современной техники и технологии все большее потребление находят редкие, редкоземельные и рассеянные металлы, содержание в рудах, которых зачастую находится на уровне сотых и тысячных долей процента. Применительно к большой группе металлов, не имеющих собственных руд (галлий, гафний, германий, рений, осмий и т. д.), попутное извлечение их при переработке руд других металлов - единственно возможный путь.

Серьезной проблемой современной металлургии является превращение производства цветных металлов в безотходное или малоотходное. Проблема отходов непосредственно связана с более полным использованием всех компонентов минерального сырья. Неиспользуемые компоненты сырья неизбежно требуют больших затрат для их обезвреживания и складирования или захоронения. Даже в виде обезвреженных продуктов отходы металлургического производства наносят ущерб окружающей среде, т. к. требуют значительных территорий для размещения и систематического контроля за их поведением под воздействием внешних условий.

Таким образом, современные технологии должны отвечать требованиям охраны окружающей среды, не являться источником вредных

выделений и не оказывать негативного воздействия на экосистему. Эти условия особенно актуальны в настоящее время, когда уровень загрязнения окружающей среды в районах расположения металлургических предприятий приближается к критическому.

Выше описанные проблемы в определенной мере решаются при использовании гидрометаллургических приемов переработки сырья. Пирометаллургические процессы создают значительно большую нагрузку за счет значительного энергопотребления (и выделения энергии в окружающую среду), пылевыноса и выделения реакционных газов. Это предопределяет расширение сферы использования гидрометаллургических процессов в цветной металлургии благодаря следующим основным преимуществам:

- возможность эффективной переработки бедного и сложного по составу металлургического сырья; богатые руды постепенно вырабатываются, и в металлургическую переработку вовлекаются все более бедные, сложные по составу, труднообогатимые руды, не пригодные для пирометаллургической переработки;

- в связи с низкими энергозатратами гидрометаллургические процессы более привлекательны, чем пирометаллургические;

- социальный эффект - осуществление процессов не требует высоких температур, отсутствует пылевынос, что обеспечивает более комфортные условия труда;

- гидрометаллургические процессы гораздо легче могут быть механизированы и автоматизированы, чем пирометаллургические;

- несмотря на значительную коррозию аппаратуры при гидрометаллургических процессах, затраты на футеровку при проведении процессов плавки выше;

- экологический эффект - сокращаются, а в некоторых случаях и устраняются выбросы продуктов реакций в атмосферу [50].

В современной металлургии гидрометаллургические процессы широко используются при производстве многих металлов: цинка, меди, никеля, кобальта, алюминия, золота, серебра, платиновых металлов, урана и других радиоактивных металлов, вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, ванадия, бериллия, редкоземельных и многих других металлов. Благодаря разработке и широкому внедрению в последние годы новых сорбционных и экстракционных методов извлечения, концентрирования и разделения металлов, развитию бесфильтрационных процессов, процессов автоклавной переработки, процессов осаждения и выделения металлов из растворов газами и др., эффективность и области применения гидрометаллургических процессов постоянно возрастают.

Приоритет в развитии биоготехнологии металлов как целой отрасли науки принадлежит Германии, США, Франции, Китаю, Канаде. Построены и действуют десятки промышленных и опытно-промышленных установок бактериального выщелачивания в ЮАР, Австралии, Бразилии, США, Канаде, Замбии, Гане, России и других странах.

В США более 15% меди и значительное количество урана добывается методами бактериального выщелачивания. При этом биовыщелачивание меди из природных забалансовых руд с содержанием 0,1–0,3% металла обходится в 2–5 раз дешевле, чем традиционная пирометаллургическая обработка [21,43].

В Болгарии методом кучного бактериального выщелачивания получают медь из отвалов, содержащих 0,1 – 0,15% Cu, по себестоимости в 3 раза ниже себестоимости меди, которую получают обычным путем. Практические данные показывают, что тионовые бактерии ускоряют процесс растворения халькопирита в 12, арсенопирита в 8, ковеллина и борнита в 18 раз. Эти микроорганизмы могут окислять практически все сульфиды тяжелых металлов, они являются строгими автотрофами, способными существовать на минеральной среде за счет энергии, выделяющейся при окислении восстановительных соединений серы и железа [51].

В настоящее время в Китае, Австралии, Уганде и США функционируют около десяти промышленных установок непрерывного чанового биоокисления, работающих по так называемой технологии ВАСОХ, разработанной канадской фирмой VasTech. В ЮАР, Бразилии, Австралии, Филиппинах, Гане, Перу, Казахстане, Китае и Узбекистане работает около 15 чановых установок по технологии ВЮХ компании Gencor, направленных на предварительную переработку упорных руд и концентратов перед традиционным извлечением золота путем выщелачивания цианированием. С помощью этих технологий удалось повысить извлечение золота из огнеупорной руды с 40 до 90% [87].

Процессы кучного и подземного выщелачивания, в том числе и бактериального, приобретают особое значение при добыче металлов из руд непосредственно в местах залегания (на глубине в отработанных шахтах), из забалансовых руд и бедных месторождений. Эти технологические приемы требуют длительного времени – от 1 до 3 лет, поскольку осуществляются в природных неконтролируемых условиях, в широком диапазоне температур, редокс потенциала и pH, при различной интенсивности ирригации (орошения), аэрации и доступности питательных веществ.

Кучное бактериальное выщелачивание в коммерческих целях впервые было реализовано в 1958 году на медном руднике Bingham Canyon (штат Юта, США) для извлечения меди из некондиционных руд. В настоящее время кучное биовыщелачивание широко применяется для извлечения меди из вторичных медных руд, содержащих минералы халькопирит ( $Cu_2S$ ) и ковеллин ( $CuS$ ). Впоследствии, начиная с 1980-х годов, многочисленные установки кучного биовыщелачивания меди были введены в эксплуатацию во многих странах мира, и в конце прошлого века мировое производство меди методом биовыщелачивания достигло 25%. Вслед за медью этот процесс был запущен на урановом руднике Elliot Lake Mine (Онтарио, Канада) для получения урана. В последние годы значительно возросло

внимание к кучному бактериальному выщелачиванию с точки зрения подготовки упорного золотосодержащего сырья к цианированию. В результате биоокисления извлечение золота увеличивается до 50,0% по сравнению с 25,7% при прямом цианировании. Проводится много исследований и укрупненных испытаний, однако до практической промышленной реализации дело еще не дошло.

В Казахстане, Узбекистане, Армении и России активно развиваются технологии бактериального выщелачивания, в основном урана, золота, меди и никеля, в силу наличия мощной сырьевой базы этих металлов и развитой структуры горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, работающих по традиционным химическим технологиям. Казахскими учеными АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения» разработана технология биохимического извлечения золота из упорных руд месторождений Акбакай, Васильковское и Бестобе, обеспечивающая повышение извлечения ценного металла на 15,0–20,0% по сравнению с классической цианидной переработкой. Еще одна разработанная биотехнология обогащения лежалых хвостов Прибалхашской и Акбакайской обогатительных фабрик позволяет получать кондиционные золотосодержащие концентраты с содержанием благородного металла 25,0–30,0 г/т при его извлечении до 70,0%, которые могут далее идти на переработку цианированием [70].

Многие из описанных к настоящему времени микроорганизмов, применяемых в биогеотехнологии, были обнаружены как в природных, так и в промышленных условиях, например, вблизи серных геотермальных источников и в рудничных водах [71].

## **1.1 Микроорганизмы, применяемые в промышленности**

### **1.1.1 Силикатные бактерии**

Силикатные биокультуры, полученные из почвы профессором В.Г.Александровым в 1939 г. выделены в самостоятельную группу в связи с их способностью разрушать силикатные комплексы, находящиеся в рудах. Данные микроорганизмы по способу питания могут быть отнесены к семейству автотрофов-хемосинтетиков, по способу дыхания - к факультативным аэробам. Развиваются силикатные бактерии всегда в виде чистых культур, даже в нестерильных условиях, т.е. являются сильными антагонистами по отношению ко многим микроорганизмам. В процессе рекультивации качественные признаки силикатных бактерий сохраняются, что является важным условием при осуществлении непрерывного процесса разложения (выщелачивания), к примеру алюмосиликатов, особенно при промышленном масштабе. Положение силикатных бактерий в систематической классификации следующее: класс - эубактерий, порядок -

эубактериалис, семейство - бацилловые, разновидность - кремниевые (силициловые или силикатные) [42].

Для поддержания нормальной жизнедеятельности силикатным бактериям необходим фосфор, источником которого может быть апатит или другие фосфорсодержащие соли. В качестве источника питания силикатные бактерии способны усваивать углерод из CO<sub>2</sub> воздуха или карбонатов, а также использовать энергию, выделяющуюся при разрушении связей кристаллической решетки силикатов [2]. Источником азота для силикатных бактерий является молекулярный азот воздуха. По этому признаку они относятся к физиологической группе азотфиксирующих микроорганизмов. Введение в питательную среду для силикатных бактерий минеральных форм азота создает неблагоприятные условия для роста и развития и обуславливает спорообразование [45].

Силикатные бактерии нуждаются в таких минеральных компонентах, как магний, калий, натрий, однако при использовании бактерий для выщелачивания из руд алюмосиликатов добавление этих компонентов не обязательно. Потребность силикатных бактерий в них полностью покрывается за счет руды [26].

Концентрация железа (до 3-5 г/л) стимулирует рост и размножение силикатных бактерий, однако большие концентрации этих компонентов в суспензиях угнетают их жизнедеятельность. Жидкое стекло и растворенный кремнезем, практически не оказывают влияния на рост и развитие. Кальций является ингибитором роста микроорганизмов при любых концентрациях (до 3-5 т/л). Это обстоятельство при переработке кальцийсодержащих пород указывает на необходимость периодической смены бактериальных растворов в процессе выщелачивания алюмосиликатов и должно учитываться при организации промышленного процесса бактериального обогащения руд [20].

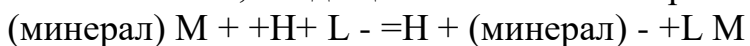
По данным исследований наиболее продуктивная фаза роста длится от 2 до 5 суток. На 7-8-е сутки развития бактериальной культуры наступает фаза отмирания. Поэтому в закрытой системе после начала культивирования необходима полная или частичная смена культуральной жидкости и введение свежей питательной среды по истечению указанного периода [2].

В деструкции силикатных минералов, входящих в состав руды, при разрушении кварца и силикатов бактерии способствуют переходу Si в раствор в виде органических комплексов и образованию биогенного кварца и других минералов [31].

Известно, что наиболее прочными связями в силикатных минералах и кварце являются ковалентные связи Si-O-Si кремнекислородного тетраэдра. Мостиковый кислород вследствие максимального использования обеих неподеленных пар электронов в 3sp<sup>3</sup> и 3d-орбиталях кремния делает кремнекислородный тетраэдр в структуре кварца и силикатов достаточно устойчивым и химически инертным. При замене Si<sup>4+</sup>, к примеру на Al<sup>3+</sup> мостиковый кислород предоставляет для связи с алюминием лишь одну неподеленную пару электронов. В результате на кислороде возникают

делокализованные электроны и ослабленная связь Al-O по сравнению с Si-O. Таким образом, прочность кварца связана, прежде всего, со степенью его структурного совершенства – чем меньше ослабленных связей, т.е. дефектных тетраэдров, тем труднее разрушается минерал [72,68].

Деградация силикатных минералов происходит благодаря образованию комплексов при взаимодействии органических соединений микробного синтеза с катионами, входящими в состав минералов:



$nH + L = nH + L M = L M + nH$  где L-органические лиганды.

Существенным признается воздействие на минерал биогенных и химических факторов, совокупность которых существенно интенсифицирует деструкцию минерального комплекса. Существует также предположение о непосредственном контакте микроорганизмов (в частности силикатных бактерий) с частицами минералов, которые захватываются слизистой бактериальной клеткой и разрушаются [32,17].

Силикатные бактерии в процессе своей жизнедеятельности продуцируют различные органические кислоты и аминокислоты, являющиеся активными агентами и играющие существенную роль, как в выщелачивании минералов, так и в переносе растворенного вещества и вторичном минералообразовании. Продуцируемые силикатными бактериями органические кислоты способствуют понижению pH бактериальной суспензии до 4,0 - 3,6. Такая среда способствует растворению карбонатов, а также оксидов и гидроксидов железа.

Процесс метаболизма силикатных бактерий управляем. При отсутствии органического углерода в питательной среде на строительство белков и других структурных компонентов бактериальной клетки используется углерод углекислоты или карбонатов. В этом случае выход органических кислот и аминокислот с продуктами метаболизма является низким (не превышает 250 мг/л), и их роль в процессах разрушения минералов и извлечения элементов невелика. При повышении в питательных средах органического углерода выход продуктов метаболизма значительно возрастает и концентрация органических кислот и аминокислот повышается. Т.е. изменяя концентрацию органического углерода в питательной среде, можно изменять концентрацию органических кислот и аминокислот в продуктах жизнедеятельности бактерий, а следовательно, изменять их активность и процессе выщелачивания минералов, и в переносе компонентов [33].

Силикатные бактерии разрушают силикаты других металлов, например, никеля, используя для этой цели свою ферментативную систему. [37,38]. В связи с этим присутствие в питательной среде органического углерода и необходимость его переработки активируют жизнедеятельность бактерий, что повышает их потребность в энергии, источником которой являются кристаллические силикаты. Следовательно, введение в питательную среду небольших количеств (до 2,5-5,0 г/л) углеводов или



другого источника органического углевода приводит к ускорению процесса разрушения силикатов.

Таким образом, введением органического углерода в питательные среды для силикатных бактерий можно интенсифицировать процесс выщелачивания силикатных минералов из руд [32,42].

Развитие живых клеток силикатных бактерий на силикатном субстрате без органического углерода протекает весьма интенсивно и позволяет высказать предположение о том, что процесс разрушения минералов силикатными бактериями интенсифицируется ферментативно, по аналогии с тионовыми бактериями и является жизнеобеспечивающим. Разрушение силикатов начинается, по-видимому, с наиболее уязвимых в их структуре тетраэдров, с участков, обеспечивающих легкость электронных переходов, т.е. с разрушения ковалентных связей в силикатной структуре (благодаря действию окислительно-восстановительных ферментов бактериальных клеток с целью их жизнеобеспечения).

### 1.2.2 Тионовые бактерии

Основные процессы, связанные с окислением серы, осуществляют тионовые бактерии. Тионовые бактерии – это наиболее важная в геохимическом отношении группа, хорошо изученная физиологически и биохимически [18,20]. Все тионовые бактерии способны использовать энергию окисления восстановленных соединений серы в серную кислоту для ассимиляции углерода, построения клеточного тела и осуществления всех остальных функций. Некоторые из тионовых бактерий могут использовать для своей жизнедеятельности, кроме окисления серы, окисление других соединений, например, органических веществ или закисного железа. Данная способность широко используется в промышленном выщелачивании металлов из руд мезофильными микроорганизмами.

Некоторые тионовые бактерии (*Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus ferrooxidans* – ацидофильные мезофильные бактерии) уже долгое время активно применяются в практике бактериального выщелачивания металлов из сульфидных руд, и они считаются наиболее эффективными в этом процессе [86,88,91].

***Acidithiobacillus thiooxidans*** – хемолитотрофная ацидофильная аэробная бактерия, которая окисляет элементарную серу и сульфиды до серной кислоты. *At. thiooxidans* играет значительную роль в биовыщелачивании металлов из сульфидных руд [84]. Микроорганизм имеет форму палочки размером  $(0.5-0.8) \times (1.0-2.0)$  мкм, с одним полярным спиралевидным жгутиком. Подвижность клеток наблюдается в молодых культурах. Размножение происходит делением пополам, причем чаще всего клетки после деления расходятся, хотя, иногда наблюдается образование цепочек. Окисление серы хорошо идет при усиленной аэрации среды [86].

*At. thiooxidans* растет облигатно автотрофно с различными соединениями серы, например, элементарной серой, тиосульфатом, тетрагидратом [92]. *At. thiooxidans* способна развиваться в сильно кислой среде вплоть до pH 0.6. В нейтральной среде микроорганизм не развивается, т.к. является ацидофильной, а не ацидотолерантной формой [18]. *At. thiooxidans* при кислой реакции среды хорошо использует различные по физическому составу формы серы. Рост *At. thiooxidans* наблюдается на следующих сульфидах металлов: ковеллит, галенит, сфалерит, вюрцит [92].

**Acidithiobacillus ferrooxidans** занимает исключительное положение среди тионовых бактерий, так как помимо способности к автотрофному росту за счет окисления соединений серы она может использовать энергию окисления закисного железа в окисное.

Микроорганизм имеет вид коротких палочек, расположенных иногда парами, большей частью поодиночке, размером  $0.4 \times (0.8-1)$  мкм. Окрашивается по Граму отрицательно, не образует спор. Имеет один полярный жгутик. Размножение происходит поперечным делением. Окисленное железо не образует каких-либо оформленных структур в клетках. Г.А. Заварзиным было подробно исследовано тонкое строение *At. ferrooxidans* и не было обнаружено существенных отличий в общей морфологии от типичных грамотрицательных бактерий, таких как *Pseudomonas*.

*At. ferrooxidans* считается строгим автотрофом. Углеродное питание *At. Ferrooxidans* обеспечивается углекислотой [18]. Роулингс упоминает о росте микроорганизма на муравьиной кислоте, что указывает на неабсолютность автотрофного питания [88]. В качестве источника азота обычно используется аммоний. Организм нуждается в значительном количестве фосфата, и увеличение скорости окисления железа находится в прямой зависимости от количества добавленного фосфата, причем железо образует с фосфатом обнаруживаемый полярографический комплекс [18].

Оптимум развития при pH около 2.5, pH 1.7 и 3.5; при pH выше 4.5 бактерии не развиваются, тем не менее, *At. ferrooxidans* обнаруживается в рудах с нейтральной реакцией, где происходит микроразнональное окисление сульфидных минералов. [18,20]

В отличие от других тионовых бактерий, *At. ferrooxidans* способна воздействовать на широкий набор сульфидных минералов. Установлено окисление следующих соединений: пирит, марказит, полидимит, реальгар, халькопирит, молибденит, кобальтин, ковеллин, марматит, виоларит, тетраэдрит, геокранит, миллерит, арсенопирит, пирротин, антимонит, аурипигмент, борнит, сфалерит, пентландит, халькозин, галенит, бравоит, энаргит [92].

## 1.2 Температурные группы микроорганизмов

Таблица 1- Температурные группы микроорганизмов

Микроорганизмы	Температура для роста, °С Источник энергий для роста Процессы Форма, размер, мкм	Возможная сфера применения
Мезофильные (25-40 °С)		
Acidithiobacillus ferrooxidans	25-40 Fe, S, Окисление сульфидных минералов Палочки с одним жгутиком 0,4 × (1-1,5)	Кучное, подземное и чановое выщелачивание металлов из сульфидных и смешанных руд и концентратов, из отходов
Acidithiobacillus thiooxidans	25-40 S Окисление сульфидных минералов Палочки со спиралевидным жгутиком 1 × (0,5-0,8)	То же
Leptospirillum ferrooxidans	30-40 Fe То же Спиралевидная палочка длиной до 3,5	То же
Термофильные (40-50 °С)		
Sulfobacillus thermosulfidooxidans	50 Fe, S То же Палочки с округлыми концами	То же
Acidithiobacillus caldus	45 S То же Палочки	То же
Acidimicrobium ferrooxidans	45-50 Fe, S То же Палочки	То же
Умеренно-термофильные (60-80 °С)		

Продолжение таблицы 1

Микроорганизмы	Температура для роста, °С Источник энергий для роста Процессы Форма, размер, мкм	Возможная сфера применения
<i>Sulfolobus metallicus</i>	60-70 Fe, S То же Сферическая	То же  То же
<i>Metallosphaera sedula</i>	65-75 Fe, S То же Сферическая	То же
<i>Acidianus brierleyi</i>	70 Fe, S То же Сферическая	

**1.3 Распространенность микроорганизма *Acidithiobacillus ferrooxidans* в рудах некоторых месторождений**

Таблица 2 - Распространенность микроорганизма *Acidithiobacillus ferrooxidans* в рудах некоторых месторождений

Месторождение	Температура проб,	pH растворов	Eh	Количество клеток в 1 г руды
<i>Медно-колчеданные месторождения</i>				
Дегтярское (Средний Урал)	10-21	2,2-30	0,50-0,78	10 <sup>5</sup> -10 <sup>8</sup>
Блявинское (Южный Урал)	10-12	0,7-1,7	0,54-0,78	10 <sup>6</sup>
Кафансоре (Армения)	15-17	2,0-2,5	0,75-0,77	10 <sup>6</sup>
<i>Колчеданно-полиметаллические месторождения</i>				

Продолжение таблицы 2

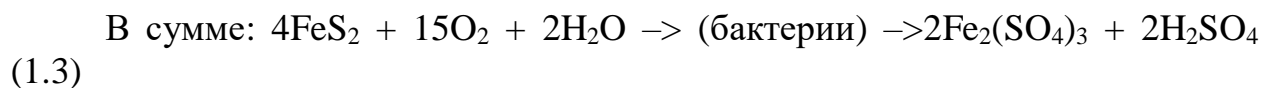
Месторождение	Температура проб,	pH растворов	Eh	Количество клеток в 1 г руды
Квемо-Болнисское (Грузия)	-	3,2-4,5	0,48-0,62	$10^4-10^7$
Маднеульское (Грузия)	-	2,5-3,7	0,52-0,72	$10^7$
Николаевское (Восточный Казахстан)	-	2,5-5,0	-	$10^2-10^5$
<i>Медно-никелевые месторождения</i>				
Кольская группа:				
Каула	2-4	7-8	-	$0-10^2$
Ниттис-Кумужье	2-4	6-8	0,20-0,40	$0-10^3$
Нюд	2-4	2,4-2,8	-	$10^3-10^4$
<i>Медные вкрапленные руды</i>				
Коунрад (Центральный Казахстан)	-	3-4	-	$10^4$
<i>Пиритизированные породы (сланцы, глины)</i>				
Черемшанское и Липовское месторождения (Средний Урал)	10-15	3-4	0,58	$10^5$
	-	4	0,68	$10^4$
<i>Золотомышьяковые месторождения</i>				
Саяк, Бакырчик (Казахстан)	-	-	-	Не обнаружено
<i>Полиметаллические месторождения</i>				
Садонская группа (Северный Кавказ):				
Садон	-	6-7	-	$0-10$
Худес	-	2-4	-	$10^2-10^4$
Уруп		3-8	-	$0-10^3$

Другая казахстанская компания «BioGeoТес» провела испытания по бактериальному окислению арсенопиритного концентрата на месторождении Бестобе, в результате чего произошло снижение содержания мышьяка в концентрате с 11,0 до 1,1%, а выход золота при последующем цианировании составил 95,0% [35]. Все перечисленные работы проводятся в укрупненном масштабе, подтверждают высокую эффективность и перспективность биотехнологического подхода и находятся на стадии дальнейшего промышленного внедрения.

#### 1.4 Технология бактериального выщелачивания

Обычно использование микроорганизмов при извлечении металлов преследует одну из двух целей: превращение (или окисление) нерастворимых

сульфидов металлов в растворимые сульфаты или создание 29 условий для лучшего взаимодействия химических веществ с поверхностью минерала и растворения необходимого металла. Примером первого процесса является превращение таких нерастворимых соединений меди, как ковеллин (CuS) или халькозин (Cu<sub>2</sub>S), в растворимые сульфаты. Примером второго процесса служит извлечение железа, мышьяка и серы из золотоносного арсенопирита (FeAsS), вследствие чего оставшееся в минерале золото легче выделяется при помощи цианирования. Оба этих процесса являются окислительными. Если добываемый металл переводится в раствор, речь идет о биовыщелачивании. Когда же металл остается в руде – о биоокислении. Тем не менее, термин «биовыщелачивание» часто используется в обоих случаях. Биологическое выщелачивание может быть применено к рудам, содержащим железо или восстановленные формы серы. Роль, которую играют микроорганизмы в биовыщелачивании, до сих пор остается невыясненной до конца. Первая попытка объяснить механизм биовыщелачивания была изложена в 1964 г Сильверманом и Эрлихом, предложив два возможных пути: прямой и непрямой. Прямое бактериальное выщелачивание происходит при физическом контакте бактериальных клеток с поверхностью минерала в несколько стадий, катализируемых ферментами:



Как известно, исследования Торма показали, что при прямом взаимодействии *Acidithiobacillus ferrooxidans* могут быть окислены следующие не содержащие железа сульфиды металлов: ковеллин (CuS), халькозин (Cu<sub>2</sub>S), сфалерит (ZnS), галенит (PbS), молибденит (MoS<sub>2</sub>), стибнит (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), кобальтин (CoS), миллерит (NiS). Таким образом, прямое бактериальное выщелачивание может быть описано следующей реакцией:



где MeS – сульфид металла. При непрямом биовыщелачивании бактерии генерируют «окислитель», который химически окисляет сульфидный минерал. В кислых растворах таким окислителем служит Fe<sup>3+</sup>, и растворение металла может быть описано следующей реакцией:



Для поддержания достаточного количества железа в растворе химическое окисление сульфидов металлов должно проводиться в кислых условиях при pH < 5.0. Двухвалентное железо, выделяющееся в данной реакции, может быть заново окислено до трехвалентного

железоокисляющими бактериями (*At. ferrooxidans* или *L.ferrooxidans*). При непрямом выщелачивании бактерии не нуждаются в контакте с поверхностью руды. Они выполняют только каталитическую функцию, ускоряя окисление  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$ . При pH 2.0-3.0 бактериальное окисление  $Fe^{2+}$  примерно в 105-106 раз быстрее, чем химическое окисление. Выделяющаяся в процессе сера может быть окислена до серной кислоты бактериями *At. ferrooxidans*. Но окисление серы бактериями *At. thiooxidans*, которые часто встречаются вместе с *At. ferrooxidans*, происходит гораздо быстрее:



Роль *At. thiooxidans*, вероятно, заключается в создании благоприятных условий для роста железоокисляющих бактерий, таких как *At. ferrooxidans* или *L. Ferrooxidans* [25].

Таким образом, биовыщелачивание основано на взаимодействии биологических и химических окислительных процессов.

Несмотря на большое количество исследований особенностей прикрепления микроорганизмов к поверхности пирита и прямого микробиологического окисления на ранних стадиях выщелачивания, существуют сомнения в оценке «степени важности» прямого механизма биовыщелачивания. В последнее время некоторые исследователи отвергают существование прямого биовыщелачивания и признают не прямое окисление единственным механизмом данного процесса. Результаты исследований натолкнули ученых на создание новой гипотезы. Одна из последних теорий о непрямом механизме через тиосульфат предложена Шипперсом и Сэндом. Согласно ей, как только клетка микроорганизма прикрепляется к поверхности не растворимого в кислоте сульфида металла (пирита  $FeS_2$ , молибденита  $MoS_2$ , тангстенита  $WS_2$ ), ион трехвалентного железа ( $Fe^{3+}$ ), содержащийся во внеклеточном экзополимерном слое, начинает не прямое действие на сульфид металла по реакции:

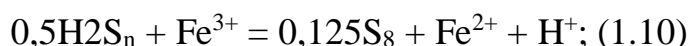
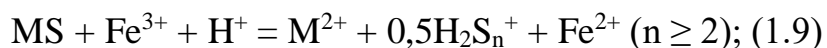


Тиосульфат является начальным промежуточным продуктом, который далее превращается в последующие промежуточные продукты (тетратионат, тритионат) с формированием сульфата в качестве конечного продукта общей реакции:



Полисульфидный механизм характерен для сульфидов, растворимых в кислотах (электронная структура позволяет им вступать в реакцию как с  $Fe^{3+}$ , так и с кислотами), таких как сфалерит ( $ZnS$ ), халькопирит ( $CuFeS_2$ ) или галенит ( $PbS$ ). В данном случае растворение сульфида происходит вследствие комбинированного действия  $Fe^{3+}$  и протонов. Основным промежуточным продуктом становится элементная сера, которая может

окисляться до сульфата сероокисляющими бактериями *At. thiooxidans* и *At. caldus*:



Образующееся  $Fe^{2+}$  может быть вновь преобразовано в  $Fe^{3+}$  благодаря активности железоокисляющих бактерий *At. ferrooxidans* или *Leptospirillum* и *Sulfobacillus*:



Таким образом, роль микроорганизмов заключается в образовании серной кислоты и  $Fe^{3+}$ .

Открытие внеклеточных полимерных соединений (ВПС), выделяемых микроорганизмами, прикрепляющимися к поверхности минерала, также способствовало выяснению механизма микробного воздействия и поддержке новой гипотезы [91]. Согласно исследованиям, формирование экзополимерного материала является важным условием прикрепления клеток к минералу и его последующего растворения. Железо, содержащееся в ВПС, придает клетке положительный заряд, обеспечивая электростатическое притяжение между микробной клеткой и отрицательно заряженной поверхностью пирита. Более того,  $Fe^{3+}$  участвует в первой стадии разрушения пирита, что обуславливает необходимость присутствия определенного количества  $Fe^{3+}$  в среде бактерий в начале процесса биовыщелачивания ( $\geq 0,2$  г/л). Таким образом, ВПС могут считаться местом начала процесса выщелачивания, где концентрированный во внеклеточном материале микробной клетки  $Fe^{3+}$  реагирует с сульфидом металла.

Существует гипотеза о трех «стратегиях» биовыщелачивания [93]:

1) непрямое биовыщелачивание: микроорганизмы не прикрепляются к поверхности минерала, и их действие ограничено возобновлением выщелачивающего агента  $Fe^{3+}$ ;

2) контактное биовыщелачивание: микроорганизмы прикрепляются к поверхности минерала, способствуя его электрохимическому растворению с помощью  $Fe^{3+}$ , содержащегося в ВПС; экзополимеры производятся клеткой для прикрепления ее к твердой поверхности минерала;

3) кооперативное биовыщелачивание: микроорганизмы, прикрепленные к минеральной поверхности, кооперируют со свободными клетками из раствора; прикрепленные бактерии высвобождают окисляемые металлы, которые служат источником энергии для микроорганизмов в растворе.

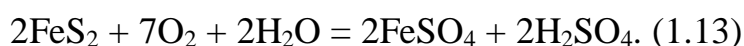


На основе результатов экспериментов и данных других исследователей, испанские ученые установили, что бактериальное выщелачивание пирита является двухстадийным.

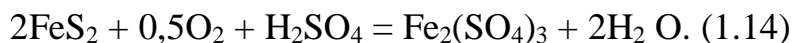
На первой стадии окисление происходит с помощью микроорганизмов, прикрепившихся к твердой поверхности минерала посредством контактного механизма. На второй стадии основным фактором растворения пирита является не прямой механизм с помощью  $Fe^{3+}$ , регенерируемого микроорганизмами в растворе. Следовательно, изначальное прикрепление микроорганизмов к поверхности сульфида играет важную роль в достижении высокой скорости растворения минерала на второй стадии, т.е. биовыщелачивание включает не прямой и контактный механизмы, и их эффективность зависит от степени прикрепления клеток и концентрации железобактерий в растворе [90].

В процессах биохимического выщелачивания сульфидных руд участвуют автотрофные бактерии, способные окислять серу, тиосульфат, а также двухвалентное железо. К таким бактериям относятся тионовые бактерии *Acidithiobacillus ferrooxidans* [12].

Механизм бактериального выщелачивания для пирита описывается следующим уравнением:



Образующееся при деструкции сульфидов двухвалентное железо окисляется в основном в растворе, причем при повышении температуры газовой фазы до 40 °C скорость реакции возрастает в 2 раза, что обеспечивает высокую скорость всего процесса:



Сульфат окиси железа, получающийся при окислении  $Fe^{2+}$  бактериями, выступает как сильный окислитель металлов, поэтому с увеличением его концентраций растет скорость бактериального выщелачивания.

Изначально бактериальное выщелачивание разрабатывали применительно к урановым и медным рудам. Впоследствии данный метод нашел успешное применение для вскрытия упорных (сульфидных) золотосодержащих руд и концентратов [47]. Сегодня биодобыча широко применяется по всему миру, увеличивая извлечение ценных компонентов из руды и концентратов, в которых драгоценный металл блокирован сульфидными минералами. Биодобыча применяется с использованием трех различных инженерных методов: биовыщелачивания из отвалов, кучного биовыщелачивания (биооксидации) и чанового биовыщелачивания (биооксидации) минералов. Биовыщелачивание обычно относится к технологии биодобычи, применяемой для основных металлов, тогда как биооксидация минералов зачастую связана с золотоносными рудами и концентратами, которые с трудом поддаются обработке [8].

Предварительная бактериальная обработка минеральных продуктов перед обогатительными и металлургическими процессами значительно интенсифицирует последние и увеличивает полноту извлечения металлов. Преимущества биодобычи при кучном биовыщелачивании, для проведения предварительного этапа обогащения медьсодержащих хвостов, в которых медь, золото связано с сульфидными минералами, заключается:

- быстрый запуск и ввод объекта в эксплуатацию;
- низкие затраты;
- отсутствие любых токсичных выбросов;
- минимизация или полное отсутствие сбросов воды, так как все растворы циркулируют в замкнутом цикле.

### **1.5 Мировая практика промышленного использования микроорганизмов при переработке минерального сырья различного типа**

В процессах бактериального выщелачивания металлов из сульфидных руд и концентратов используются микроорганизмы, окисляющие железо (II), серу и сульфидные минералы. Наиболее широко биотехнология применяется при переработке золото- и медь содержащего сырья [29].

Существует несколько разновидностей технологии чанового биоокисления упорных сульфидных золотосодержащих концентратов, среди которых наиболее распространенной является схема BIOX™ [6].

Технология BIOX™. Развитие данной, технологии началось в конце 70-х гг. в Южной Африке компанией Дженкор (Gencor). Успешное развитие процесса привело к созданию опытно-промышленного завода BIOX™ в 1984 г., с последующим строительством первой промышленной установки на руднике Фэйрвью (Fairview) в 1986 г. Данный завод вышел на полную производственную мощность в 1991 г., когда предприятие было расширено для переработки всего объема концентрата, получаемого на обогатительной фабрике, а обжиговые печи Эдвардса были демонтированы [79].

По технологии BIOX™ подлежат переработке флотационные концентраты с минимальным содержанием сульфидной серы 6%, что необходимо для стабильной и активной жизнедеятельности используемых для биоокисления микроорганизмов, которые представлены ассоциацией мезофильных бактерий. В данную ассоциацию входят следующие виды: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillns thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*. Представленная смешанная культура может работать в интервале температур 30-45°C. Температура пульпы в промышленных реакторах держится на уровне 40-45°C [95, 40].

В цикле биоокисления обычно установлено 6 реакторов одинакового размера. Первые три реактора работают параллельно, остальные три - последовательно. Плотность пульпы питания составляет 20% тв. Крупность

концентрата, подвергаемого бактериальному выщелачиванию, составляет 80% -75 мкм. Увеличение тонины помола до 80% -20 мкм может увеличить скорость окисления сульфидных минералов, однако приведет к трудностям на следующих этапах переработки: увеличит вязкость пульпы и потребует большей площади сгустителей [94,95]. Продолжительность бактериального выщелачивания составляет 4-6 дней в зависимости от состава перерабатываемого концентрата.

После биоокисления пульпа поступает на сгущение, где подвергается 3кратной противоточной декантации. Слив сгустителя направляется на операцию осаждения мышьяка и железа из раствора, а разгрузка - на дальнейшее извлечение золота методом цианирования с углем (CIP/CIL) [94].

ВаcТех процесс является еще одним эффективным, но менее распространенным вариантом вскрытия заключенного в сульфиды золота с помощью микроорганизмов. Компания ВаcТех была основана в начале 1980-х для развития биотехнологии с использованием умереннотермофильных бактерий. Первым заводом, использующим представленную технологию для переработки упорных сульфидных золотосодержащих руд, стал завод Юнами (Yunani) в Западной Австралии. Технология предусматривает рабочую температуру в реакторах на уровне 50°C. В 1997 г. ВаcТех вступает в партнёрские отношения с компанией Mintek (Йоханнесбург, Южная Африка) для развития технологии биовыщелачивания. В результате данного сотрудничества были построены заводы в Тасмании (Beaconsfield, Tasmania) и Китае (Laizhou, Shandong Province) для переработки сульфидных золотосодержащих концентратов с использованием мезофильных бактерий *A.caldus*, *L.ferrooxidans*.

BIONORDR. Данная технология создана для переработки упорного концентрата, получаемого при обогащении первичной золотосодержащей руды в суровых климатических условиях Севера России. С её помощью отрабатывается месторождение "Олимпиадинское". Бактериальному окислению подвергается флотационный концентрат, полученный при обогащении первичной руды. Далее следует операция фильтрации (ЗИФ-3), промывки, репульпации биокека, нейтрализации и интенсивной аэрации перед цианированием. Сорбционное выщелачивание продукта бактериального окисления проводят с использованием метода «уголь в пульпе» [58].

Ассоциация микроорганизмов, используемая в процессе BIONORDR, состоит из следующих видов микроорганизмов: *Sulfobacillusolympiadicus*, *Ferroplasmaacidiphilum*, *Leptospirillum ferrooxidans*. Температура пульпы поддерживается на уровне 37-39°C. Продолжительность биоокисления - 120 часов при массовой доли твердого в исходном питании 14-18%. Процесс бактериального выщелачивания осуществляется в трех первичных, работающих параллельно реакторах, и далее в трех последовательных [49].

Чановая бактериальная переработка кобальтсодержащего сырья. В 1989 г. компания BRGM, Франция, начала изучение процесса

биовыщелачивания кобальтсодержащих пиритных хвостов рудника Килембе (Kilembe) в Уганде [76]. Результатом этих исследований явилось создание в 1993 г. пилотного реактора, рабочим объемом 65 м<sup>3</sup>. В 1999 г. для Казеской Кобальтовой Компании (Kasese Cobalt Company) был спроектирован и построен завод по биовыщелачиванию кобальта из пиритовых хвостов с мощностью 1 млн.т. хвостов. Уникальность данной технологии применительно к этому месторождению заключается в том, что из пиритных хвостов помимо кобальта попутно извлекаются еще 3 металла: цинк, медь, никель. При этом основную ценность составляет кобальт [78].

В процесс бактериального выщелачивания поступают пиритные хвосты, предварительно измельченные до 80% класса -35 мкм. Плотность питания цикла биовыщелачивания - 20% тв. Рабочая температура в танках поддерживается на уровне 42.°С, рН составляет 1,4-1,5 и 1,5-1,7 в первичных и вторичных реакторах соответственно. Для окисления пирита используется ассоциация мезофильных и умеренно-термофильных микроорганизмов: *Leptospirillum*, *At.thiooxidans*, *At.caldus*, *Sulfobacilhisthermo sulfidooxidans* [80,22].

Степень окисления пирита в первичных реакторах находится на уровне 60%. Во вторичных пирит доокисляется еще на 20-30%. Извлечение кобальта в раствор составляет 80%. Продолжительность биовыщелачивания - 6 суток.

Пульпа после биовыщелачивания направляется на фильтрацию, а фильтрат – в цикл очистки насыщенного раствора от железа и последующего извлечения цинка, меди, кобальта и никеля. Извлечение кобальта из раствора составляет 99,9%.

Чановое биовыщелачивание халькопиритового концентрата. В мире большое внимание развитию технологии чанового биоокисления халькопиритового концентрата уделяют такие компании, как: BRGM, VacTech/Mintek, ВНР-Billiton [1].

В 2001 г. компанией Mintek был получен патент на процесс чанового и кучного выщелачивания халькопирита с контролированием окислительного потенциала пульпы. Для этого используются термофильные микроорганизмы, способные контролировать значение окислительного потенциала на границе халькопирит-бактерия. Показано, что термофильные микроорганизмы более эффективны для выщелачивания данного вида сырья. [81,55]

В дальнейшем компания VacTech/Mintek совместно с Industrias Penoles (Мексика) на руднике в Монтеррее (Monterrey, Mexico) построила опытный завод с полным циклом переработки медного концентрата: биовыщелачивание умеренно-термофильными микроорганизмами, экстракция органическими растворителями, электроэкстракция [80,89].

Для переработки халькопиритового концентрата компания ВНР Billiton разработала биотехнологию BioCOPR с использованием экстремально-термофильных архей [74]. Пилотные тесты с использованием данной технологии были проведены совместно с КОДЕЛКО (CODELCO) на руднике

Манса (Mansa Mina), Чили. Данная технология предусматривает чановое выщелачивание флотационного концентрата мезофильными, умеренно-термофильными и термофильными микроорганизмами при температуре 65-80°C. После многочисленных лабораторных испытаний был построен опытно-промышленный завод производительностью 20000 т/год катодной меди, который успешно проработал 18 месяцев в период 2004-2005 гг. По полученным результатам работы данного предприятия было принято решение о строительстве завода производительностью 100000 т/год катодной меди [77]. Также промышленные реакторы установлены на руднике Перинг (Pering Mine), Южная Африка, для подтверждения ранее полученных результатов и отработки технологии [75]. В настоящее время этот процесс известен как Billiton-CODELCO [73].

*Кучное бактериальное окисление концентратов цветных и благородных металлов.* Компанией ГеоБиотикс (GeoBiotics) разработана и запатентована технология GEOSOAT™, предназначенная для переработки сульфидных концентратов благородных или цветных металлов методом кучного выщелачивания, которая, по утверждению разработчиков, совмещает в себе «высокое извлечение чанового процесса с низкими затратами кучного процесса» [77]. Для переработки руды благородных или цветных металлов кучным выщелачиванием, компания разработала технологию GEOLEACH™.

В качестве инокулята используются мезофильные *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, а также термофильные археи *Sulfolobus* и *Acidianus*.

Технология GEOSOATR с успехом применяется компанией African PioneerMining's на руднике Агнес (Agnes), Южная Африка. Данное предприятие было введено в строй в 2003 году для переработки 12000 т упорного сульфидного золотосодержащего концентрата в год. Продолжительность кучного биовыщелачивания составляет 60-75 дней [82]. В настоящее время компания ГеоБиотикс проводит исследования по применению технологии для переработки дважды упорных руд золоторудного пояса Карлин, Невада и Ашанти, Гана.

*Кучное бактериальное выщелачивание сульфидных никелевых руд.* В мире существует много крупных никелевых месторождений с низким содержанием никеля, одним из которых является самое крупное в Европе месторождение в Соткамо (Sotkamo), Финляндия. Запасы данного месторождения насчитывают 340 млн. тонн руды с содержанием, %, 0,27 Ni, 0,14 Си, 0,02 Со, 0,56 Zn. Содержание сульфидов железа составляет 16%. Из них 2/3 приходится на пирротин и 1/3 на пирит. Никель представлен пентландитом и виоларитом [48].

Многочисленные исследования, проведенные в 80-х годах, показали, что наиболее перспективным методом извлечения никеля является кучное биовыщелачивание всей массы руды. По результатам проведенных работ летом 2005 г. была воздвигнута 50000 т пилотная куча.

Ассоциация микроорганизмов, участвующая в процессе бактериального выщелачивания, представлена следующими видами: *At. ferrooxidans*, *At. Thiooxidans* или *At.alertness*, *At. caldus*, *Leptospirillum ferrooxidans* [83].

На Международном Конгрессе Обогащителей в Пекине в 2008 году (XXIV IMPC, Beijing, China) был сделан доклад об еще одном пилотном испытании кучного выщелачивания сульфидной никелевой руды. Речь шла о месторождении Моджианг (Mojiang), провинция Юннань (Yunnan), Китай, запасы которого оцениваются в 4 млн тонн руды с содержанием, %: 0,5 Ni, 0,34 As. На 50% никелевые минералы представлены герсдорфитом. Часть никеля заключена в пирите, содержание которого в руде составляет 22% [3,63].

В 2003 году были закончены, лабораторные испытания по бактериальному выщелачиванию никеля, и в июне того же года была сооружена 10000 т пилотная куча. Температура процесса варьировалась в пределах 38-55°C в зависимости от сезона. Выщелачивание проводилось 39 аборигенными адаптированными мезофильными и умереннотермофильными микроорганизмами. По результатам пилотных испытаний было показано, что извлечение никеля в раствор в промышленных масштабах должно составить 70% при продолжительности выщелачивания 1 год [9].

Компанией *Titan Resources NL* разработана технология кучного выщелачивания медно-никелевых руд с использованием термофильных бактерий или комбинацией их с мезофильными. Исследования показали, что более 90% никеля, меди и кобальта можно извлечь из медно-никелевой руды (0,73% Ni и 0,87% Си) методом кучного бактериального выщелачивания с использованием бактерий при температуре 45-60°C [88].

*Кучное бактериальное выщелачивание медных руд.* Процесс кучного выщелачивания меди применяется уже более 400 лет: в 1566 году в Северной Венгрии был организован полный цикл выщелачивания меди с использованием системы орошения. В Испании на руднике Рио-Тинто начали применять принудительное кучное выщелачивание меди из руд, содержащих 1,5% меди и 45% пирита в 1725 году. Этот процесс используется там до сих пор. В России также проводилось извлечение меди методом кучного выщелачивания из руд Волковского, Николаевского и других месторождений. В настоящее время принято различать кучное выщелачивание отвалов бедных руд и вскрышных пород и выщелачивание руд из специально складированных куч. Причем это может быть чисто химическое или бактериально-химическое выщелачивание. Химическое или сернокислородное выщелачивание применяется для выщелачивания меди из окисленных руд, когда медь на 70% и более представлена окисленными минералами. Бактериально-химическое выщелачивание меди эффективно в тех случаях, когда сульфидными минералами меди представлено более 70% всей меди, содержащейся в руде [32].

В 1980 году на руднике Lo Aguirre было начато промышленное освоение технологии SX/EW (жидкостная экстракция-электроэкстракция). Также было начато освоение технологии бактериального кучного выщелачивания, вследствие того, что в дальнейшем предполагалось преобладание сульфидных медных руд над окисленными. В 1985 году данная технология была введена в строй. В 2001 году, из-за исчерпания запасов руды, предприятие было закрыто, демонтировано и заново построено на новом месте: руднике La Cascada. В данный момент в Чили работает 8 предприятий, перерабатывающих бедную сульфидную медную руду по технологии кучное бактериальное выщелачивание - жидкостная экстракция - электроэкстракция. Продолжительность биоокисления варьирует в пределах 300-500 дней для каждого предприятия в зависимости от состава сырья и температуры [77].

Также на руднике Chuquicamata действует бактериальное выщелачивание горных отвалов и вскрышных пород «на месте», то есть без создания специальной кучи. Содержание меди составляет 0,3% и менее, извлечение в раствор планировалось 25%, но по последним сообщениям это значение составляет 15%.

*Кучное бактериальное выщелачивание упорных руд золота (BIOPRO™)* В 1988 г. вследствие сокращения запасов окисленных и увеличения сульфидных руд золота на руднике Голд Кори (Gold Quarry), компанией Ньюмонт были начаты лабораторные исследования процессов биоокисления [85]. Опытные-промышленные испытания данной технологии начались в 1990 г. и продолжались четыре года, по результатам которых было принято решения о постройке промышленной кучи и ее переработки. В конце 1999 г. было получено первое золото. Данное предприятие успешно эксплуатируется и в настоящее время.

В процессе кучного бактериального выщелачивания участвует ассоциация мезофильных, умеренно-термофильных и термофильных микроорганизмов [64,65]. При этом на ранних этапах исследований куча инокулировалась бактериями *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum* и *Sidfobacillus*. Термофильных архей в процессах испытаний обнаружено не было. Однако с увеличением размера кучи стали возникать высокотемпературные зоны, где разогрев доходил до 80°C, что поставило вопрос об исследованиях необходимости добавления новых родов микроорганизмов [27].

В результате проведенных экспериментов был сделан вывод о том, что в инокулят необходимо вводить термофильные археи *Acidianus*, *Metallosphaera*, *Sulfolobus* [41]. Продолжительность кучного биоокисления составляет 90-250 дней и зависит от вида перерабатываемого сырья. Извлечение золота при последующем цианировании по методу CIL находится на уровне 53,8%.

Таким образом, анализ практики применения микроорганизмов в технологиях переработки минерального сырья показал, что перспективным

направлением интенсификации процесса бактериального окисления упорного золотосодержащего сырья может быть использование высокоэффективных штаммов термофильных, умеренно-термофильных или мезофильных бактерий, образующих ассоциации [58,28].

Так для кобальтсодержащего сырья используется ассоциация мезофильных и умеренно-термофильных микроорганизмов, активно работающая при  $t=42^{\circ}\text{C}$ . Широкое применение термофилов и умеренных термофилов нашло при кучном бактериальном выщелачивании медных, никелевых и золотых руд и концентратов [62].

Несмотря на широкое использование ассоциаций микроорганизмов, в литературе отсутствуют данные по изучению кинетических закономерностей процесса биоокисления упорных золотосодержащих концентратов различными культурами бактерий, а также влияния технологических параметров на формирование качественного и количественного состава ассоциации микроорганизмов [8].

## **1.6 Выводы после исследования биовыщелачивания меди в литературных источниках**

Преимущества биотехнологических методов добычи и переработки меди металлов заключаются не только в экологических и экономических аспектах, которые бесспорны в данном случае, но и в том, что они направлены на переработку упорных концентратов, хвостохранилищ, и забалансовых руд хранящих в себе сотни миллионов валюты. Помимо этого классические методы переработки в данном случае малоэффективны.

Несмотря на то, что процессы добычи и переработки геогенного и техногенного сырья с участием микроорганизмов уже заняли прочную позицию в мировой практике, они способны конкурировать на сегодня с традиционными технологиями только в отраслях цветной металлургии, связанных с добычей и переработкой сульфидного (медного, уранового, цинкового, никелевого, золотосодержащего) сырья. В литературе отсутствуют данные о разработках биотехнологических подходов к переработке перспективного техногенного сырья, в частности, для извлечения редких металлов – отходов добычи. Что касается сведений о возможности целенаправленного или попутного получения редких металлов бактериальным выщелачиванием, то они весьма ограничены и сводятся к известной работе профессора Agrad E. Torma, в которой он приводит данные о выщелачивании с помощью *Thiobacillus ferrooxidans* германия и галлия из побочных продуктов переработки алюминия, цинка и меди, в частности, сульфидных минералов - сфалерита и халькопирита, причем с весьма низкими показателями по извлечению редких металлов (до 20%).



## **2. Технология переработки техногенных месторождений**

Техногенные месторождения (ТМ) – техногенные образования (отвалы горнодобывающих предприятий, хвостохранилища обогатительных фабрик, шлакозольные отвалы топливно-энергетического комплекса, шлаки и шламы металлургического производства, шлам, шлак и т.д. отвалы химической отрасли) на поверхности Земли по количеству и качеству содержащегося в них минерального сырья пригодные для промышленного использования в настоящее время или в будущем по мере развития науки и техники и изменения экономических условий.

Появившиеся в последние десятилетия техногенные месторождения являются результатом интенсивного развития горнодобывающей и перерабатывающей промышленности. Техногенные месторождения представляют собой класс месторождений, сформировавшихся в районах горнорудной промышленности (Украина, Казахстан, Северо-запад и Юго-восток европейской части России, Урал, Юго-восток и Восток азиатской части, Центр Сибири и др.). Эти месторождения обычно обладают своеобразным минеральным составом и являются потенциальным источником разнообразных полезных ископаемых, в частности цветных, редких и благородных металлов, а также строительных материалов (щебень, песок, гравий и т.д.) [69].

### **2.1 Общие сведения о хвостовом хозяйстве.**

#### **2.1.1 Отвалы некондиционных руд и вскрышных пород**

##### **Общие требования:**

Хвостовое хозяйство комбината, транспортировку хвостов от фабрики и само хвостохранилище проектируют в соответствии со СНиП специализированные организации, а технологические институты выдают исходные данные по хвостовой пульпе и производственному водоснабжению внутри фабрики для генпроектировщика или организации, проектирующей хвостохранилище.

При разработке исходных данных для проектирования хвостового и производственного водоснабжения необходимо использовать следующие нормативные документы и инструкции:

Определение расчетных гидрогеологических характеристик хвостохранилищ;

- Строительная климатология и геофизика;
- Строительство в сейсмических районах ;
- Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования;
- Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования;

- Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования;
- Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод;
- Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию;
- Внутренний водопровод и канализация зданий;
- Водоснабжение. Наружные сети и сооружения;
- Канализация. Наружные сети и сооружения;
- Магистральные трубопроводы;
- Плотины из грунтовых материалов;
- Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений;
- Рекомендации по проектированию и строительству шламонакопителей и хвостохранилищ металлургической промышленности;
- Временные указания по технологии возведения наливных хвостохранилищ горнообогатительных комбинатов;
- Правила безопасности при эксплуатации хвостовых и шламовых хозяйств горнорудных и нерудных предприятий.

### **2.1.2 Основные параметры хвостов ОФ:**

- Плотность отвальных хвостов обогатительной фабрики обуславливается принятой схемой оборотного водоснабжения и складирования хвостов;
  - при полном оборотном водоснабжении через хвостохранилище определяется технологической схемой фабрики;
  - при частичном оборотном водоснабжении через сгустители определяется плотностью песков сгустителя, которая должна быть в пределах 35-50% твердого;
  - при оборотном водоснабжении через сгустители с фильтрованием хвостов принимается, исходя из возможности их транспортировки ленточными конвейерами в отвалы.

### **2.1.3 Водоснабжение в т. ч. оборотное, водоподготовка:**

- Водоснабжение обогатительной фабрики должно предусматриваться с полным водооборотом из хвостохранилища;
- Водоснабжение из внешних источников проектируется из расчета обеспечения водой только в пусковой период. Постоянное использование свежей воды на производственные нужды допускается в объеме потерь воды

с концентратом, на растворение реагентов и приточных аспирационных установок;

- Показателями качества воды, определяющими ее пригодность для использования на горно-обогатительных комбинатах, являются содержание взвешенных веществ, цветность, запах, вкус, сухой остаток, минеральный остаток, общая жесткость и ее составляющие, биологическое и химическое потребление кислорода, рН, содержание реагентов и веществ, мешающих повторному использованию сточных вод;

- Взвешенные вещества – нерастворимые в воде примеси органического и неорганического происхождения, количество которых выражается в миллиграммах, содержащихся в 1 л воды;

- Цветность воды, обусловленная обычно растворенными в ней органическими соединениями и наличием взвешенных веществ, измеряется в градусах платиново-кобальтовой шкалы;

- Запах воды бывает естественного происхождения (от живых или отмирающих в воде организмов и т. д.) и искусственного (от промышленных сточных вод, обработки воды реагентами и т. д.). Он определяется органолептическим методом по пятибалльной шкале;

- Вкус определяется только для чистой воды по пятибалльной шкале;

- Сухой остаток воды – суммарное количество растворимых в ней нелетучих молекулярнодисперсных и коллоидных веществ минерального и органического происхождения, выраженное в миллиграммах, содержащихся в 1 л воды;

- Минеральный остаток – сумма всех содержащихся в воде катионов и анионов;

- Жесткость воды – это совокупность свойств, обусловленных содержанием в воде ионов  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ . Суммарное содержание растворенных в воде солей кальция и магния представляет общую жесткость. Общую жесткость воды выражают в мг-экв/л;

- Биологическое потребление кислорода (БПК) – это количество кислорода в миллиграммах на килограмм воды, которое требуется для окисления находящихся в воде органических веществ за 5 суток (БПК5) или 20 суток (БПК20) На практике определяют биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК5), которое для вод, загрязненных хозяйственно-бытовыми стоками, составляет около 70% полного БПК20;

- Химическое потребление кислорода (ХПК) – это количество кислорода в миллиграммах на литр воды, которое требуется для окисления находящихся в воде веществ, способных окисляться;

- Химический состав и концентрация загрязнений в оборотной воде. Состав загрязнений сточных вод зависит в основном от физико-химических свойств обогащаемого сырья и применяемых реагентов. Основным загрязняющим компонентом сточных вод являются взвешенные

вещества, которые образуются при измельчении руд и в определенных условиях могут находиться длительный период в хвостовой пульпе и осветленной воде [44];

Требования к производственно-технической воде зависят от способа обогащения. При плохом осветлении пульпы в хвостохранилище и несоответствии качества оборотной воды технологическим требованиям предусматриваются сооружения водоподготовки для добавки коагулянта и других реагентов. Для этой же цели могут использоваться вторичные отстойники. В случае, когда отвод поверхностных вод с водосборной площади хвостохранилища нагорными канавами или другими сооружениями недостаточен и в хвостохранилище образуется избыток сточных вод, не принимаемых в оборот на фабрику, предусматриваются очистные сооружения для глубокой очистки дебалансовых вод и сброса их в естественные водоемы в соответствии с санитарными и рыбохозяйственными требованиями. В засушливых районах для этой же цели могут сооружаться пруды-испарители.

При флотации вода дополнительно загрязняется эфирсодержащими веществами. Поэтому воду необходимо очищать перед сбросом в хвостохранилище. В результате очистки сточных вод достигается нормативное качество воды для использования ее в системах оборотного водоснабжения.

Очистку сточных вод осуществляют естественным, механическим, биохимическим, химическим, электрокоагуляционным и другими способами.

- Естественная очистка производится отстаиванием хвостовой пульпы в хвостохранилище. Этот способ широко применяется на ГОКах при очистке сточных вод от взвешенных веществ. Содержание их в воде снижается до 27 мг/л. Естественная очистка на современных ГОКах требует больших площадей для отстаивания (до 2000 га) и не позволяет очистить сточные воды от реагентов и солей при применении флотации;

- Механическая очистка применяется преимущественно как предварительная для создания более эффективных условий последующей доочистки сточных вод другим способом. При механической очистке из сточных вод удаляют крупные частицы твердой фазы в песколовках, отстойниках, гидравлических классификаторах, гидроциклонах. Механическая очистка применяется непосредственно на обогатительных и агломерационных фабриках;

- Совместная биохимическая очистка применяется для очистки стоков обратной флотации железных руд и хозяйственно-бытовых стоков. Биохимическая очистка происходит в результате окисления вредных примесей с помощью аэробных бактерий. При разбавлении стоков обратной флотации хозяйственно-бытовыми стоками в соотношении 1:7 и более не нарушается жизнедеятельность бактерий в очистных сооружениях. Сточная вода имеет БПК<sub>5</sub> 12 мг О<sub>2</sub> в 1 л и цветность 10 градусов;

- Наиболее глубокая очистка сточных вод в лабораторных или промышленных условиях происходит химическим способом с применением гашеной извести, железного купороса, сернокислого алюминия, серной кислоты и особенно сульфогля или активированного угля. Высокоэффективным реагентом для очистки сточных вод является гашеная известь, так как она переводит таловое масло и другие жирные кислоты в кальциевые соли, выпадающие в осадок. Применение извести и железного купороса соответственно 0,75 и 0,25 кг/м<sup>3</sup> пульпы позволяет очистить сточные воды обратной флотации железных руд до БПК<sub>5</sub> 15 мг О<sub>2</sub> на 1 л и цветности 150-200 градусов;

В связи с тем, что оборотная вода из хвостохранилища содержит большое количество растворимых солей (3000 – 5000) мг/л и твердых взвесей (10 – 600) мг/л, на обогатительных фабриках должны предусматриваться три системы водоснабжения:

- а. система подачи воды из хвостохранилища непосредственно в технологический процесс фабрики или после необходимой водоподготовки, проектируемой по рекомендациям проведенных исследований;

- б. система кондиционированной оборотной воды для охлаждения подшипников оборудования и пылеподавления аспирационных установок;

- с. система свежей воды.

Для снижения затрат на систему свежей воды следует рассматривать пуск фабрики на оборотной воде, если есть возможность предварительной организации пруда за счет аккумуляции поверхностного стока в хвостохранилище [52].

Работу фабрики и хвостохранилища при полном водообороте следует рассматривать как единый технологический процесс. Поэтому прекращение подачи оборотной воды или временный перевод фабрики на свежую воду, отрицательно скажется на технологических показателях.

Насосные станции оборотной воды и пульпонасосные станции должны иметь двойной независимый подвод электроснабжения и два водовода оборотной воды. Один водовод допускается прокладывать при обеспечении времени ремонта (24 ч) за счет использования запасов воды из резервуаров и работе фабрики по аварийному графику (50–70 % производительности). Вода подается из водосборного коллектора хвостохранилища в насосную станцию оборотной воды, как правило, без разрыва струи – непосредственно в насосы. Такой подвод воды позволяет производить любое регулирование расхода и экономит электроэнергию за счет использования напора от уровня воды в пруде хвостохранилища [53].

Схема оборотного водоснабжения и складирования отвальных хвостов выбирается на основе технико-экономического сравнения с учетом возможного развития предприятия. Независимо от принятой схемы, необходимо, с целью уменьшения расхода воды, предусматривать в проектах максимальное применение внутреннего водооборота.

## **2.2 Водоотведение**

Водосбросные сооружения предназначены для отвода и возврата в оборотный цикл осветленной и предварительно очищенной воды.

Конструкция водосбросных сооружений должна обеспечивать отвод вод с различных отметок горизонта воды в прудке хвостохранилища в связи с непрерывным подъемом гребня плотины или дамб обвалования в процессе эксплуатации.

Размещать водосбросные сооружения необходимо на расстоянии от места выпуска пульпы которое должно обеспечивать требования к осветлению пульпы. В качестве водосбросных сооружений могут применяться также колодцы железобетонного или металлического типа, сифонные и трубчатые водосбросы. Выбор типа водосбросных сооружений определяется технико-экономическим сравнением вариантов, а также эксплуатационными соображениями [54].

Расчет водосбросных сооружений необходимо производить на максимальный расход осветленной воды, необходимой для предприятия на расчетный период эксплуатации.

## **2.3 Подготовка хвостов к складированию**

При мокром процессе обогащения руды образуются отходы (хвосты) в виде пульпы, которая с помощью гидравлического транспорта перемещается в специально организуемые гидравлические отвалы – хвостохранилища. В хвостохранилище производятся технологическая укладка хвостов, механическое осветление жидкой фазы пульпы. Осветленная вода направляется в оборот на фабрику. Одним из перспективных направлений по сокращению площадей, отчуждаемых под хвостохранилища, сокращению капитальных и эксплуатационных затрат хвостовых хозяйств является глубокое обезвоживание, сухое складирование и комплексное использование хвостов. Подготовка хвостов к складированию заключается в кондиционировании пульпы по плотности с целью обеспечения требуемой массовой доли твердого для гидротранспорта и глубоком обезвоживании для сухого складирования. При необходимости производится фракционирование твердой фазы хвостов путем разделения по крупности при гидравлической классификации и грохочении. Для каждого варианта предварительного сгущения производят технико-экономические расчеты.

На территории Казахстана в результате деятельности промышленных предприятий только твердых отходов накоплено свыше 20 млрд. тонн. Эти отходы негативно влияют на природные ландшафты и экологические условия, занимая площадь плодородных земель и ухудшая среду обитания человека. Техногенные месторождения приводят к исключению из хозяйственного оборота больших площадей земель, занятых отходами

производства. Золототвалы занимают тысячи гектаров, отходы железнорудных компаний, медных, хромовых и другие.

Кроме того, происходит уничтожение или снижение качества земель из-за пылевых заносов с отвалов и хвостохранилищ. Например, с 1 га отвалов ежегодно может сноситься до 500 тонн пыли. Идет загрязнение окружающей среды (почв, поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха) тяжёлыми металлами и солями в концентрациях, нередко превышающих допустимые нормы.

Значительны объёмы загрязнённой оборотной воды которые составляют млн. куб метров.. Содержание в сбрасываемой воде таких элементов как F, V и Mn превышает ПДК в десятки и сотни раз. И такие данные можно привезти практически по всем видам отвалов. Угольные имеют свойство возгораться, при этом выносятся газы и загрязняется воздух токсинами (мышьяк, серы и т.п.)

С другой стороны наличие таких отвалов и техногенных месторождений создают возможности для развития отрасли биовыщелачивания.

В развитых индустриальных странах мира уровень использования промышленных отходов достигает 70-80%, тогда как в Казахстане и ближнем зарубежье он не превышает 12-15%.

В США, например, из промотходов получают 20% всего алюминия, 33% железа, 50% свинца и цинка, 44% меди и т.д. Подобная тенденция использования вторичных ресурсов наблюдается в Канаде, Великобритании, ЮАР, Испании и других странах. Например:

- В штате Монтана (США) из отвалов рудника Мандиски получают ежегодно 2 т Au и 4 т Ag при содержании в отвалах золота – 0,84 г/т и серебра – 2,8 г/т.

- В штате Мичиган (США) из хвостов обогащения, содержащих 0,3% Cu, достигнуто извлечение 60% меди.

- В ЮАР из отвалов золотоизвлекательных фабрик при содержании золота – 0,53 г/т и урана – 40 г/т получают 3,5 т золота и 696 т урана в год при производительности 50000 т/сутки [11].

Для Казахстана и стран, производящих значительную долю всей минеральной продукции мира и обладающих мощным горнопромышленным потенциалом, проблема утилизации промышленных отходов имеет первостепенное значение. Важным обстоятельством является то, что себестоимость товарной продукции из промышленных отходов в 5-15 раз меньше, чем из добываемых традиционными способами руд месторождений полезных ископаемых. Активное использование промышленных отходов минерального сырья позволит получить прибыль в миллиарды долларов ежегодно.

Исследования показывают настоятельную необходимость изучения и утилизации техногенных месторождений Казахстана.

*Вовлечение в переработку техногенного сырья обеспечивает:*

1. Сокращение расходов на поиски новых и разведку эксплуатируемых месторождений.
2. Сохранение истощающихся минеральных ресурсов в недрах, так как запасов полезных компонент, накопившихся в отходах ГОК-ов, достаточно чтобы удовлетворить потребности на многие десятилетия вперёд.
3. Повышение производительности труда за счёт рентабельной переработки уже добытого сырья, являющегося, по существу, готовым полупродуктом и находящегося вблизи действующих предприятий, что особенно важно для тех из них, для которых вследствие истощения сырьевой базы оказываются незагруженными производственные мощности, и высвобождается рабочая сила.
4. Улучшение условий труда, так как техногенные месторождения расположены на поверхности Земли в отличие от всё более глубокозалегающих обычных месторождений полезных ископаемых.
5. Производство дешёвых стройматериалов (песок, щебень, гравий, цемент, абразивы, материал для отсыпки дорожного полотна, строительства плотин, дамб, и т.д.), а из шлаков - шлаковаты, шлакового литья (брусчатка, тубинги, плитки, бордюрный камень и т.д.), литого шлакового щебня, стеклокерамических изделий, вяжущих добавок в цемент, минеральных добавок для улучшения почв, удобрений для сельского хозяйства и др.
6. Освобождение занимаемых им земель и их рекультивацию и ликвидацию источников загрязнения окружающей среды, улучшая тем самым экологическую обстановку вокруг действующих предприятий. Это относится к тем техногенным месторождениям, освоение которых сопровождается производством стройматериалов. Если же осуществляется только добыча металлов (цветных, редких и благородных), то из-за низкого их содержания количество техногенных отходов практически не уменьшается [24].

Таким образом, всё вышеизложенное указывает на актуальность и важность проблемы переработки и полной утилизации отходов горнорудной, металлургической, топливно-энергетической и химической отраслей промышленности. Уже существующие и перспективные технологические разработки позволяют оптимистически оценивать прибыльность переработки техногенных месторождений и возможность перехода к безотходным технологиям для их полной ликвидации.

#### **2.4 Утилизация бытовой и электрической техникой**

Бытовые приборы, стекло, бумага, пластик – это те товары, которые образуют более 50 процентов ТБО. Основной проблемой Казахстана является его обширная территория и небольшое количество населения. Это затрудняет переработку и сбор электронных и других бытовых отходов, а также строительство мусороперерабатывающих предприятий.



## 2.5 Эксплуатация хвостохранилищ

Содержимое хвостохранилища – это измельченная горная порода с примесью химических веществ после извлечения из нее ценных компонентов.

Как правило хвосты ОФ поступают через *пульпопровод*.

Пульпопровод – это трубопровод по которому пульпа, являющаяся раствором измельченной горной породы с примесью химических веществ после извлечения из нее ценных компонентов, попадает в хвостохранилище [16]. Обычно один основной и второй резервный. Учитывая значительную поверхность хвостохранилища требуется мероприятия для предотвращения попадания поверхностных вод в чашу водохранилища из окружающих склонов. Для этого используют отводный каналы.

### 2.5.1 Мониторинг безопасности хвостохранилища

Для обеспечения безопасной эксплуатации объектов хвостохранилища проводится регулярный мониторинг по контрольно-измерительным приборам и аппаратам [19].

Таблица 4 - Рекомендуемая частота измерений при мониторинге участка хвостохранилища

№	Параметры	Рекомендуемая частота
1	Контролируемые параметры дамбы (высота, длина, трещины и признаки эрозии, перемещение гребня)	Еженедельно
2	Контролируемые параметры лагуны (высота наполнения, ширина пляжа)	Еженедельно
3	Контролируемые параметры фильтрации (линия фильтрации, размыв дамбы, давление воды в порах экранов и дамбы)	Ежемесячно
4	Состав и физико-механические свойства хвостовых материалов	Раз в год
5	Уровень и состав подземных вод на участке расположения хвостохранилища	Ежемесячно
6	Состав поверхностных вод на водных объектах в зоне хвостохранилища	Ежеквартально
7	Состав и количество дренажной воды	Ежемесячно
8	Находится ли в рабочем состоянии дренажная система	Ежемесячно

Продолжение таблицы 4

№	Параметры	Рекомендуемая частота
9	Показатели количества и состава сточных вод	Ежемесячно
10	Рабочие параметры трубопроводов и насосов в пределах, указанных в руководстве по эксплуатации	Ежемесячно
11	Контролируемые физико-механические свойства грунтов, образующих дамбу	Раз в год
12	Контролируемые физико-механические свойства грунтов, подстилающих хвостохранилище	Раз в год
13	Находятся ли в допустимых пределах контролируемые физико-механические свойства грунтов в прилегающей к хвостохранилищу зоне	Раз в год
14	Параметры состояния поверхностного защитного покрытия	Раз в год
15	Оползни и просадки грунта	Раз в год
16	Сейсмическая активность	По мере необходимости с учетом сейсмичности района

### 2.5.2 Безопасность хвостохранилища

Безопасность хвостохранилища – состояние хвостохранилища, которое позволяет обеспечивать защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды, безопасное функционирование инфраструктуры и хозяйственных объектов [46].

Гидротехнические сооружения являются весьма ответственными сооружениями, поэтому аварии (прорывов плотин или ограждающих дамб хвостохранилищ) могут привести к катастрофическим последствиям с нанесением ущерба предприятиям, сельскому хозяйству, дорожному, жилищно-коммунальному хозяйству и населению.

В настоящее время длительность сроков эксплуатации большинства гидротехнических сооружений (ГТС), в частности хвостохранилищ (земляных плотин, дамб) при ограниченности финансовых ресурсов нередко приводит к опасному их состоянию и снижению надежности. От

правильности и оперативности принимаемых решений по определению уровня безопасности зависит надежная и бесперебойная эксплуатация этих сооружений. Дамбы хвостохранилищ может разрушиться также в связи с переливом воды через ее гребень (если отметка гребня дамбы назначена неправильно) или в результате оползания откосов, находящихся под воздействием фильтрационных сил, и по ряду других причин, являющихся специфичными для работы тела дамбы. При сочетании неблагоприятных факторов массив намывной дамбы может перейти в неравновесное состояние и потерять устойчивость. К внешним факторам относятся природные и техногенные факторы, а также технология возведения, наращивания и эксплуатации сооружения, а к внутренним – изменение физико-механических характеристик пород тела дамбы в период после их возведения и в процессе уплотнения насыпной (намывной) массы, прочностные характеристики грунтов основания; гидродинамические, гидростатические, сейсмические и динамические силы. Характерной чертой оползней является медленное накопление деформаций с последующим быстрым обрушением массива. Этот вид деформаций является наиболее крупным по объему и размерам захватываемых участков. Международный опыт эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС), показывает, что в большинстве случаев причиной аварий является воздействие фильтрационного потока в основании и в теле дамбы. Другие причины - неверные расчеты при оценке максимально возможного паводка. В связи с этим, для безопасной эксплуатации ГТС, необходимо уделять особое внимание комплексу контрольно-измерительных систем.

Под контрольно-измерительной системой подразумевается комплекс контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), установленной на ГТС (пьезометры, водомерные рейки, контрольные марки, опорные репера и т.д.) и предназначенной для контроля над состоянием ГТС на протяжении всего периода эксплуатации. При этом сбор информации от контрольно-измерительной аппаратуры и устройств может проводиться полностью вручную, в полуавтоматизированном и автоматизированном режиме наблюдений. В последнем случае в состав комплекса входит автоматизированная система опроса контрольноизмерительной аппаратуры (АСО КИА) [34].

Хвостохранилище при аварийной ситуации использует «План ликвидации аварий на участке хвостового хозяйства» который регламентирует порядок работы при возникновении чрезвычайных ситуаций на объектах хвостового хозяйства, с целью уменьшения негативного воздействия на здоровье людей и окружающую среду. Данный план должен пройти экспертизу в государственных органах.

Появившиеся в последние десятилетия техногенные месторождения являются результатом интенсивного развития горнодобывающей и перерабатывающей промышленности.

## 2.6 Образование техногенных месторождений и их классификация

Для последних десятилетий характерен гигантский рост потребления энергетических и минеральных ресурсов: угля, нефти, газа, рудных и нерудных полезных ископаемых. При этом создается масса отходов, что существенно сказывается на экологическом состоянии отдельных регионов. Кроме того, эти отходы могут быть использованы в будущем, а частью и в настоящее время как дополнительный источник минерального сырья, то есть техногенных месторождений. Суммарное содержание полезных компонентов, которые накапливаются в техногенных месторождениях за 20-30 лет, сопоставимо, а иногда и превышает их количество в ежегодно добываемых рудах [36].

Особенностями техногенных месторождений являются: 1) расположение в промышленно развитых районах; 2) месторождения находятся на поверхности, и материал в них преимущественно раздроблен; 3) количество искусственных минеральных форм, которые образуются в техногенных месторождениях, превышает 30 000, что значительно превосходит число известных в настоящее время природных минералов, составляющее около 3300 [68].

Классификация техногенных месторождений построена на ряде признаков, важнейшим из которых является процесс их образования на рисунке 4.

Горное производство оставляет после себя отвалы, сложенные раздробленными породами, вмещающими руды, убогими рудами, которые экономически невыгодно перерабатывать, а также продуктами переработки промышленных руд - отходами обогащения.

В эту группу техногенных месторождений входят терриконы угольных шахт и разрезов; отвалы рудников и карьеров сульфидных руд цветных металлов; отвалы рудников и карьеров оксидных и силикатных руд черных и легирующих металлов; шламы и хвостохранилища горнообогажительных фабрик (отходы обогащения руд специалисты называют хвостами) [67,68].

Сложное строение имеют техногенные месторождения, представленные отвалами энергетического и металлургического производства, которые состоят из шлаков, шламов, пылей, зол, металлов и их сплавов, используемых в металлургии огнеупорных материалов [23].

Как и природные месторождения полезных ископаемых, техногенные месторождения имеют определенную структуру распределения полезных компонентов, зоны вторичного обогащения, окисления, но в отличие от них обычно характеризуются низкими содержаниями полезных компонентов.



Рисунок 4 - Классификация техногенных месторождений

### 2.6.1 Состав полезных компонентов и использование сырья техногенных месторождений

Во многих рудных районах, достаточно широко распространены техногенные месторождения, представленные раздробленными горными породами и убогими рудами. Отвальные массы используют для строительных целей, закладки выработанного пространства в подземных выработках, рекультивации. Однако достаточно часто в подобные отвалы попадают и полезные компоненты, которые во время разработки не представляли промышленного интереса. Во многих случаях для переработки техногенного сырья требуются иные технологии, чем для природных руд, чаще всего новые способы, основанные на последних достижениях науки и техники. Например, Известно урановое хвостохранилище в г.Актау. В настоящее время начата переработка этих отходов в Степногорске в компании «Сареко» где доизвлекаются редкоземельные металлы и элементы [7].

Более перспективными по содержанию и запасам полезных компонентов по сравнению с месторождениями-отвалами горнодобывающих предприятий являются хвосты обогащения руд черных и цветных металлов. Хвосты - это отходы обогащения полезных ископаемых, в которых содержание ценного компонента естественно ниже, чем в исходном сырье, поскольку в них преобладают частицы пустой породы [15]. Твердая фаза

хвостовой пульпы представлена смесью минеральных частиц разного размера - от 3 мм до долей микрона. Состав частиц и их плотность зависят от минерального состава пород, вмещающих полезное ископаемое. В настоящее время на Урале работают 10 обогатительных фабрик, которые перерабатывают медные и медно-цинковые руды. При производстве медных, цинковых и пиритных концентратов образуется ежегодно 5-7 млн т хвостов, в которых содержится 0,3-0,4% цинка, 0,2-0,3% меди, 20-35% серы, более 35% железа. Значительную площадь (260 га) занимает, например, Черемшанское шламохранилище Высокогорского ГОКа, в котором сосредоточено около 40 млн. т. отходов обогащения железных руд.

Отходы обогащения более удобны для утилизации, чем отвалы, поскольку они, во-первых, более однородны, а во-вторых, представляют собой уже дробленный, иногда фракционированный материал. Наиболее перспективны для использования в строительстве отходы, образующиеся при сухих способах обогащения - хвосты сухой магнитной сепарации, сухой гравитации.

Хвосты сухой магнитной сепарации отличаются повышенной крупностью (20-70 мм) и пониженным содержанием металлов. После предварительной подготовки (рассева) они полностью используются в качестве щебня. Хвосты мокрой магнитной сепарации являются мелкодисперсными отходами, за год на горнообогатительных комбинатах их накапливается миллионы тонн. Они содержат много ценных металлов, в том числе скандия, галлия, стронция, титана.

Нисколько не уступают по набору и количеству ценных компонентов хвостохранилища обогатительных фабрик, перерабатывающих руды цветных металлов.

По общим запасам хвостохранилища некоторых предприятий существенно превосходят многие месторождения. Вовлечение их в разработку облегчается тем, что при этом не нужны вскрышные и буровзрывные работы. Раздробленный материал подготовлен для извлечения металлов современными методами, в частности выщелачиванием кислотами.

Запасы металлов в отходах металлургического производства, преимущественно в шлаках, также значительны. Шлак представляет собой затвердевший металлургический расплав, который покрывал поверхность жидкого металла. Формируется шлак при плавлении пустой породы, флюсов и т.д. Он является ценным вторичным сырьем и широко применяется в строительстве. Гранулированные шлаки используют для получения шлакопортландцемента, в качестве заполнителя для бетонов, в дорожном строительстве; из шлаковых расплавов вырабатывают минеральную вату, шлаковую пемзу, шлаковое литье.

Разработка техногенных месторождений, представленных отвалами металлургического производства, связана с определенными трудностями из-за сложности состава шлаков и часто значительной неоднородностью

отвалов, особенно тех, которые накапливаются при электрометаллургическом производстве ферросплавов.

Вторая группа подобных техногенных месторождений представляет собой скопления шлаков цветной металлургии, которые поступают в отвалы после предварительной грануляции или в горячем состоянии. Конвертерный медеплавильный шлак содержит до 70% FeO при относительно небольших количествах кремнезема. Его минеральную основу составляет минерал фаялит ( $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ), а второстепенные минералы представлены цинкосодержащим магнетитом, купритом ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), теноритом ( $\text{CuO}$ ), сульфидами меди и железа. В небольшом количестве в шлаках присутствуют также стекло и металлическая медь [56,57].

Особое место занимают золоотвалы тепловых электростанций. Зола - твердый остаток, образующийся при сгорании топлива (углей, горючих сланцев, торфа), состоит из тонкодисперсного порошка, так называемой золы-уноса и шлака - сплавленного кускового материала [13].

Шлаки используют в строительстве, зола-унос в основном складывается в мокрых золоотвалах и лишь частично используется в цементной промышленности в качестве сырья и добавок, при производстве строительной керамики, асфальтобетона, обжигового и безобжигового гравия.

### **3 Исследовательская часть**

#### **3.1 Методика исследования и оценки техногенных месторождений**

Методика исследования техногенных месторождений в значительной мере отличается от изучения природных объектов. Это обусловлено, с одной стороны, компактным размещением техногенных месторождений непосредственно в зоне промышленных предприятий, с другой стороны - необходимостью исследования их часто необычного и сложного минерального состава [56,57].

Проведение комплексных исследований включает в себя несколько последовательных этапов, первым и наиболее важным из которых являются оценочные работы. Они состоят из опробования материала откосов и поверхности отвалов, а также керн скважин колонкового бурения. На втором этапе выполняют аналитические и минералогические исследования с целью изучения состава техногенного месторождения. В последние годы для этих целей все более широко используют ядерно-физические методы анализа, которые можно применять для веществ любого агрегатного состояния (твердого, жидкого, газообразного) и которые наиболее эффективны для определения тяжелых и радиоактивных металлов.

Третий этап завершается обработкой полученной информации, составлением геологической карты и разрезов, оценкой концентраций полезных компонентов и прогнозной оценкой запасов. С целью представления данных о техногенных месторождениях для их последующей переработки в настоящее время формируется база данных техногенных месторождений Казахстана. Для оценки прогнозных ресурсов полезных компонентов используют все имеющиеся аналитические данные, прогнозные ресурсы при этом характеризуются в первую очередь объемом отвала и содержанием полезного компонента [57].

#### **3.2 Подготовка пробы к исследованию**

В настоящее время накопились значительные запасы лежалых хвостов хвостохранилища «Боргезсай» и «Старое». Запасы по хвостохранилищу оцениваются в количестве до 1 млрд тонн. Оценка проб показала что среднее содержание меди в хвостах составляет 0,15-0,2 %.

В этой связи была поставлена задача провести лабораторные исследования доизвлечения меди из этих медных хвостов. Тем самым решается задача получения дохода за счет получения медного концентрата и очищения хвостохранилища от тяжелых металлов. Учитывая, что хвосты представлены в измельченном виде то не требуются затраты на дробление и измельчение [59].



По предварительному минералогическому анализу показано, что в пробах содержатся медные минералы такие как халькопирит, ковеллин, халькозин, борнит и другие. Среди других минералов встречаются: крайне редко зерна пирита, гематит, магнетит, гидроксиды железа, арсенопирит, рутил.

Для проведения исследований на технологическую извлекаемость была предоставлена проба весом 6 кг из отработанного хвостохранилища в Джебгазгане.

Исходная проба подвергалась усреднению (способом кольца и конуса и квартованием) отобрана по 4 пробы весом по 0,2 кг каждая для проведения теста по выщелачиванию. Дополнительно отобрана пробы для ситового анализа и определения вещественного состава в количестве 0,2 кг. Две пробы были использованы для определения оптимального режимов процесса.

Для экспресс анализа и оценки результатов экспериментов был использован рентгенофлуоресцентный анализ проб.

### **3.3 Проведение исследований**

Наличие тонковкрапленных минералов меди в кварце и других минералах требует для их раскрытия дополнительного измельчения, что требует дополнительных значительных затрат. Для решения проблемы необходимы меры по деструкции минералов кварца с целью высвобождения тонковкрапленных минералов меди.

Для переработки хвостов технология выщелачивания меди является эффективной по капитальным и эксплуатационным затратам.

Учитывая данные минералогического и рентгенфлуоресцентного анализа проб, наличие сульфидных минералов меди, наличие общей серы содержание которой достигало 5-7 %, было проведено выщелачивание при различных режимах. Для ускорения процесса использовалось бактериально-химическое выщелачивание.

#### **3.3.1 Перколяционное выщелачивание**

Условия эксперимента:

Размер пробы руды - от -1мм до -0,074мм

Время выщелачивания 96 часов

Состав выщелачивающего раствора - 5 г/л  $H_2SO_4$

Содержание двухвалентного железа - +4-6 г/л  $Fe^{2+}$

Концентрация клеток  $10^6$  кл/мл (*Th.ferrooxidans*)

При проведении исследований раствор просачивался частично, с течением времени просачивание замедлялось. Перколяцию проводили для

проверки применимости кучного выщелачивания хвостов обогатительной фабрики.

Проведение перколяции было затруднено на основе полученного тонкоизмельченного материала проб (-0,074 мм) при наличии глинистой составляющей (глинистая составляющая при А1 до 4 %). При проведении перколяции раствор просачивался очень медленно и показатели были низкими.

### **3.3.2 Агитационное выщелачивание**

В лабораторных условиях в активаторе выщелачивали пробу с навеской пробы 200 гр ( при Т:Ж=1:4 , при содержании  $H_2SO_4$  (5г/л) , рН=2) в течение 96 часов в четырех колбах с разными пробами.

При химическом (без добавления бактерий) агитационном выщелачивании не были достигнуты необходимые параметры извлечения. Извлечение меди составило 30 % в течение 8 часов

Для интенсификации процесса использовали бактериальное выщелачивание с штаммами бактерий *Th.ferrooxidans*. Из литературных источников известно, что бактериальное выщелачивание позволяет ускорить растворение халькопирита в 12 раз, арсенопирита и сфалерита в 7 раз, ковелина и борнита в 18 раз по сравнению с обычными химическими методами. Данные минералогического анализа представленных проб подтверждают наличие таких минералов.

### **3.4 Исследование бактериально-химического выщелачивания проб**

Важнейший фактор бактериального выщелачивания – это быстрая регенерация сернокислого окисного железа тионовыми бактериями, что ускоряет процесс окисления и выщелачивания. В промышленных масштабах бактериальное выщелачивание применяется для кучного выщелачивания полезных ископаемых (меди и урана) из руд на месте их залегания. Экономически целесообразно извлекать с помощью бактериального выщелачивания медь из забалансовых сульфидных руд. Это осуществляется водными растворами трехвалентного железа в присутствии железоокисляющих бактерий [61].

Простота аппаратуры для бактериального выщелачивания и возможность быстрого размножения бактерий, особенно при возвращении в процесс отработанных растворов, содержащих бактерии, предоставляет возможность не только снизить себестоимость извлечения металлов, но и значительно увеличить сырьевые ресурсы за счет использования бедных, забалансовых руд в месторождениях, а также отходов обогащения и хвостов.

### 3.5 Механизм окисления сульфидов металлов

Различают два основных механизма бактериального окисления сульфидов: косвенный и прямой. Тионовые бактерии являются хемоавтотрофами, то есть единственный источник энергии для их жизнедеятельности – процессы окисления закисного железа, сульфидов различных металлов и элементарной серы. Эта энергия расходуется на усвоение углекислоты выделяемой из атмосферы или из руды. Получаемый углерод идет на построение клеточной ткани бактерий. *A.Ferrooxidans* окисляют сульфидные минералы до сульфатов прямым и косвенным путем.

*Косвенный механизм* окисления сульфидов металлов протекает по следующей схеме:



*Прямой механизм окисления сульфидов* - этот механизм основан на прикреплении бактерий к сульфидам и за счет процессов во внеклеточном поверхностном слое происходит окисление сульфидов [60,4]. На рисунке ниже представлен этот механизм:



Рисунок 1 - Контактное выщелачивание пирита бактериями

При проведении исследований использовали среду 9 К (Сильвермана и Люндгрена). Концентрация бактерий в растворе составляла  $10^6$  кл/мл, что позволило достижение оптимума биообработки материала.

### 3.6 Подготовка бактериального раствора

Для проведения бактериального выщелачивания выращивали биомассу бактерий *A. Ferrooxidans* в течение 5 суток. Питательная среда *A. Ferrooxidans* состоит из:

$\text{FeSO}_4$  - 5 г/л

$\text{NH}_4\text{SO}_4$  - 1,5 г/л

$\text{MgSO}_4$  – 0,5 г/л

$\text{K}_2\text{HPO}_4$  - 0,5 г/л

$\text{H}_2\text{SO}_4$  – 1г/л

### 3.7 Методика проведения эксперимента

Агитационное бактериальное выщелачивание хвостов проводили на пробе массой 200 грамм при соотношении Т:Ж = 1:4, температура 25 С, 250 об/мин.

Промывка образца  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1%) + бактериальное вскрытие.

По 200 гр пробы выщелачивали в 1000 мл раствора, содержащего до 10 г/л серной кислоты. После кислотной обработки провели бактериальное выщелачивание. Бактериальное выщелачивание проводили в течение 120 часов бактериальным раствором *A. Ferrooxidans*. Содержание трехвалентного железа  $\text{Fe}^{3+}$  составляло 3г/л. Выщелачивание проводили при  $T=25\text{C}$ , Т:Ж =1:4.

Используемые микроорганизмы адаптированы к данной пробе для проведения эффективного биоокисления. Использовали температурный режим при 25 °С с использованием мезофильных бактерий.

Как видно из рисунка биовыщелачивание меди в лабораторных исследованиях приблизились в течение 4 суток к 80 %

Данные показывают применимость использования агитационного бактериального окисления для хвостов данного месторождения. Результаты химического и спектрального анализа приведены в таблице 3.

Результаты анализов исходной пробы хвостов показали, что промышленное значение имеет медь. В пробах при РФА-е отмечено наличие большого количества редкоземельных металлов. Возможность выделения их при выщелачивании требует дополнительных исследований.

Из полученных данных следует, что агитационное бактериально-химическое выщелачивание позволяет извлечь до 72 % меди в раствор с 0,18% до 0,05%

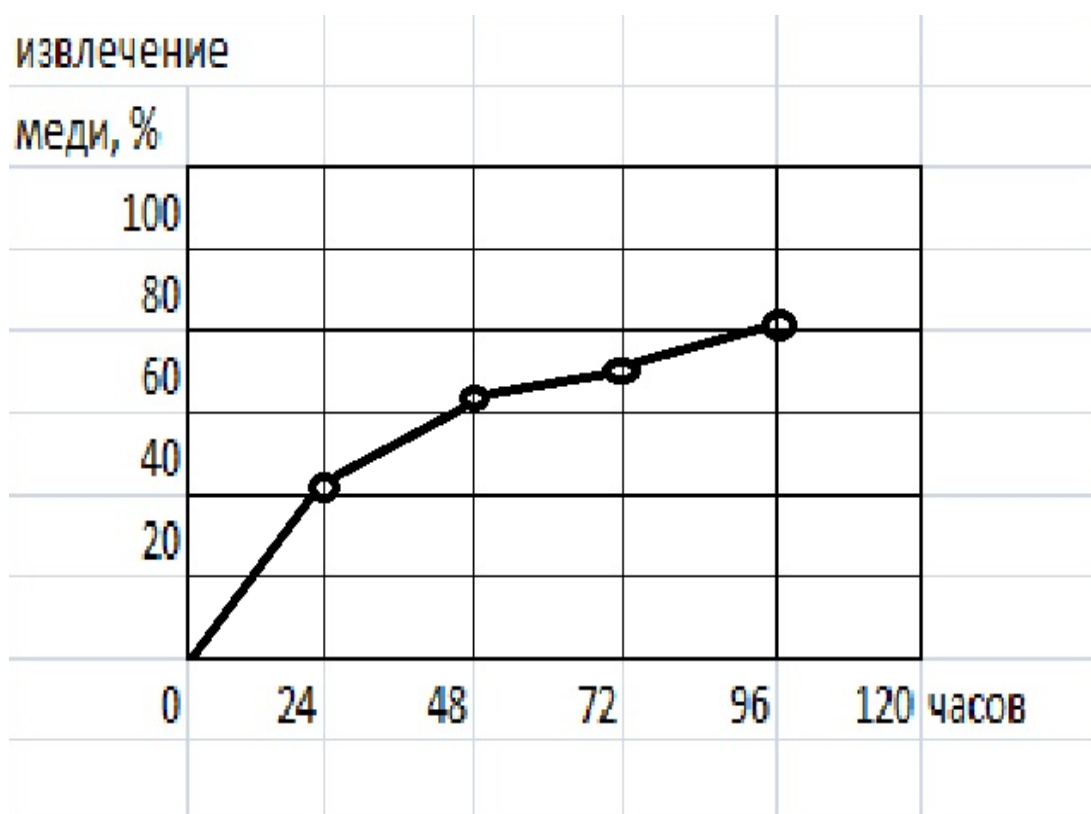


Рисунок 2 - Зависимость извлечения от времени биовыщелачивания

Таблица 3 - Результаты химического анализа

№	Компоненты	Содержание, %
1	Cu	0,08
4	Zn	0,01
6	Fe <sub>общ</sub>	0,5
7	S	0,08

*Показатели агитационного бактериально-химического выщелачивания приведены ниже:*

Следует выделить результаты по одной из проб №(Б6 (2)+0,15 т . Исходная проба №(Б6 (2)+0,15 т =1 г содержание меди 0,647 % . После выщелачивания в проба №(Б6 (2) 0,15) т=1 г содержание меди составила 0,117 % . Эти данные показывают, что фактически степень извлечения меди была достигнута 81,9 % . Сернокислотное агитационное бактериальное выщелачивание пробы проводили в течение 120 часов . Эти данные показывают эффективность сернокислотного биовыщелачивания в агитаторе .

Примечание: В одной из исходных проб было зафиксировано отсутствие серы (общей), что объясняется естественным выщелачиванием сульфидов (лежалые хвосты).

Ниже представлена технологическая схема по биовыщелачиванию меди из хвостов месторождения с получением медного концентрата на рисунке 3.

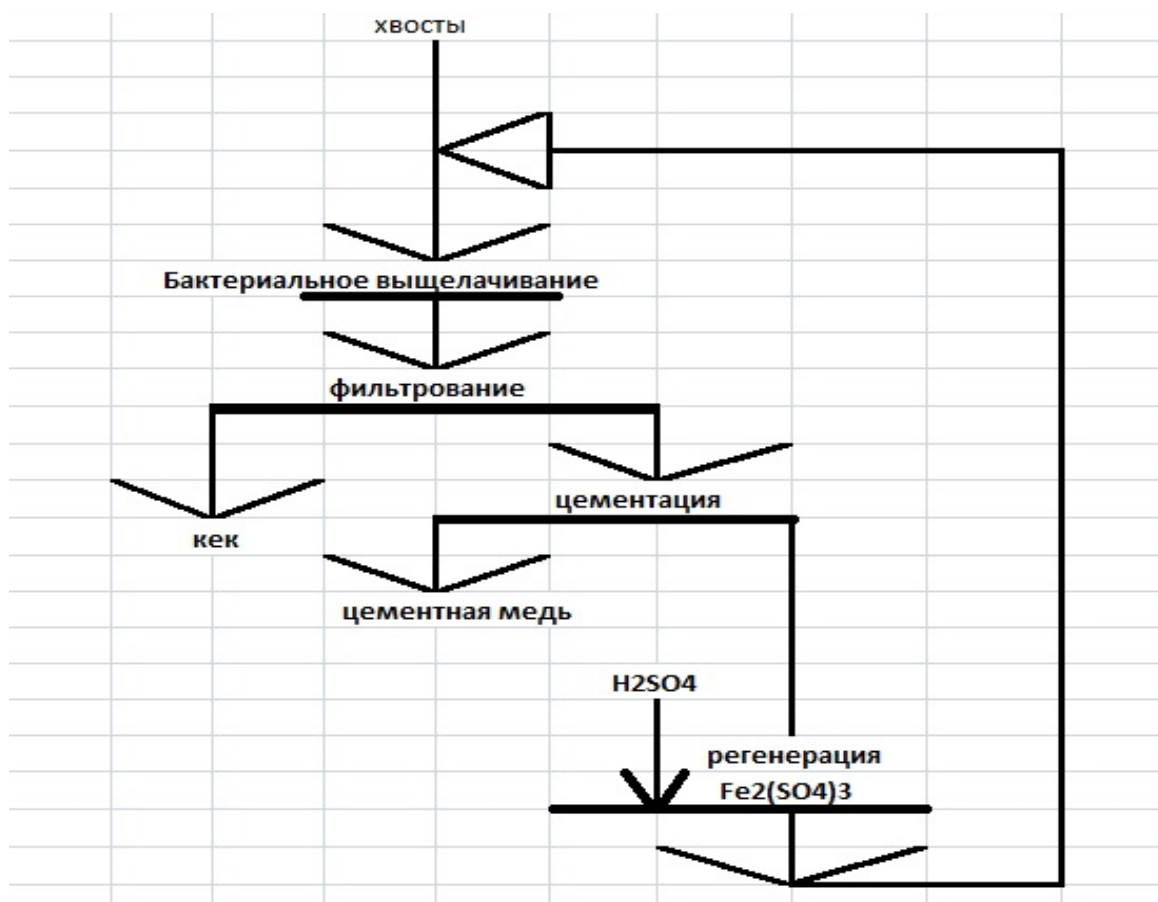


Рисунок 3 - Технологическая схема выщелачивания меди

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении магистерской диссертации были исследованы:

1. На пробах хвостов хвостохранилища Боргезсай проводили исследования по использованию сернокислотного выщелачивания. Хвосты тонкоизмельченные и классификация варьируется от  $+0,15$  мм до  $-0,074$  мм.

2. Минеральный анализ показывает, что зерна медных минералов тонковкраплены в кварце и других минералах. Размеры зерен меньше 20 мкрн. Такая тонковкрапленность медных зерен объясняет наличие высокого содержания меди, которое не было извлечено при переработке на обогатительной фабрике. Для полного раскрытия минералов требуется деструкция минералов с целью освобождения медных включений.

3. Показано, что для оптимального извлечения меди из хвостов предполагается провести выщелачивание с доизмельчением на следующих этапах исследования. Сверхтонкое измельчение для деструкции минералов является дорогостоящей процедурой. Альтернативой такого процесса является проведение биоразложения кварцевых зерен с целью высвобождения медных минералов и доступа выщелачивающих реагентов к ним.

4. Перколяционным выщелачиванием (аналог кучного выщелачивания) не достигнут технологический эффект.

5. Агитационное химическое выщелачивание проб показало эффективность процесса. За 96 часа извлечение меди составило около 30 %.

6. Использование бактериально-химического выщелачивания позволяет достигнуть извлечения свыше 80 % за 72 часа. Рекомендовано использование бактериального сернокислотного выщелачивания для интенсификации процесса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Э.В. Процессы бактериального выщелачивания в комбинированной технологии переработки минерального сырья / Э.В. Адамов, Г.И. Каравайко // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). 1999. №2. С. 20-25.
2. Александров В.Г. Силикатные бактерии. М: Сельхозгиз, 1953. 114 с.
3. Аленичев В.М., Уманский А.Б., Ключников А.М. Разработка технологии кучного выщелачивания окисленных никелевых руд уральских месторождений // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Vol. 322 № 3. — pp. 124-128.
4. Бектай Е.К., Турысбекова Г.С., Меретуков М.А., Бектаев М.Е. «Природные наночастицы и наноструктуры». Алматы, 2018 г. 600 стр.
5. Белан Л.Н. Эколого - геохимическое состояние горнорудных районов Башкирского Зауралья // Вестник ОГУ. - 2005. - № 6. - С. 113-117.
6. Бердинова К. Магистральный вектор Акбакай // Горнометаллургическая промышленность, 2013. №5,6. С. 50-54.
7. Беркинбаев Г.Д., Федоров Г.В., Бенсман В.А. ТОО «Экосервис С», Обращение с радиоактивными отходами в Казахстане, 2008
8. Биологические науки – Экология и биотехнология. —, 2012.
9. Блайда И.А. Влияние состава выщелачивающих растворов на процессы бактериального извлечения металлов из промышленных отходов / И.А. Блайда, Т.В. Васильева, Л.И. Слюсаренко и др. // Biotechnologia Acta, 2012. № 3. С. 084-090.
10. Варданын Н.С., Нагдалян С.З. Периодический процесс биовыщелачивания упорной золотосодержащей пиритной руды // Прикладная биохимия и микробиология. - 2009. - Т. 45, № 45. - С. 446 - 451.
11. Вилкул Ю.Г., Азарян А.А., Азарян В.А., Трачук А.А., Проблемы переработки минерального сырья техногенных месторождений Украины, НТ журнал «Горная промышленность», Москва, 2011, с. 13-15.
12. Воздействие силикатных бактерий на минеральные составляющие промышленных руд / М.Пурэвдаш, С.Н.Салтыкова, Е.С.Афанащенко, Н.М.Теляков // Обогащение руд. 2011. № 1. С.15-19.
13. Волженский А. В., Иванов И. А., Виноградов Б. Н. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. М. : Стройиздат, 1984. 255 с.
14. Геология полезных ископаемых. Учебник для высшей школы.- М.: Академический проект, 2004. 512с.(«Gaudeamus», «Классический университетский учебник»).
15. Горлова О.В. Техногенные месторождения. - Магнитогорск: МГМА: 1997- С. 68.
16. ГОСТ 17520-72 Средства землесосные общего назначения. Термины и определения



17. Дарьин А.А. Изучение механизма деструктивного воздействия силикатных бактерий на кварцсодержащие руды / А.А. Дарьин, А.В. Максимова, А.Н. Теляков и др. // Обогащение руд, 2015. №4 (358). С. 8-12.
18. Заварзин Г.А. Литотрофные микроорганизмы. Москва: Наука, 1972. 254 с.
19. Закон Республики Казахстан от 11 апреля 2014 года "О гражданской защите" подпункт 14) статья 12-2.
20. Каравайко Г.И. Биогeотехнология металлов / Г.И.Каравайко, С.Н.Грудев / Центр международных проектов ГКНТ. М., 1989. С.11-29.
21. Каравайко Г.И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов / Г.И. Каравайко, С.И. Кузнецов, А.И. Голомзик. М.: Наука, 1972. 272 с.
22. Кондратьева Т.Ф., Пивоварова Т.А., Каравайко Г.И. Структурные особенности хромосомной ДНК у штаммов *Thiobacillus ferrooxidans*, адаптированных к росту на средах с пиритом или элементарной серой // Микробиология. - 1996. - Т65, № 5. - С.675 - 681.
23. Коняев В.П., Крючкова Л.А., Туманова Е.С. Техногенное минеральное сырье России и направление его использования // Инф. сб. М., 1994. Вып. 1. 42 с.
24. Кочуров, Б.И. Экономика и управление природопользованием : учебное пособие / Б.И. Кочуров, В.Л. Юлинов ; Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. – Архангельск : Северный (Арктический) федеральный университет (САФУ), 2013. – 215 с.
25. Крылова Н.Н., Адамов Э.В., Пивоварова Т.А., Кондратьева Т.Ф. Режимы кучного бактериально-химического выщелачивания медной руды Удоканского месторождения // Цветные металлы. - 2011. - № 7. - С. 16 - 20.
26. Лазутин Н.А. Развитие микроорганизмов в процессе кучного выщелачивания золотосульфидных руд / Н.А. Лазутин, Л.И. Зайнитдинова // Узбекский биологический журнал, 2006. №1. С. 87-91.
27. Левенец О.О. Научно-техническое обоснование способов биовыщелачивания в мезофильных условиях сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка): автореф. дис. ... канд. тех. наук: 03.01.06 / Левенец Ольга Олеговна. Улан-Удэ, 2012. 20 с.
28. Левенец О.О. Изучение биологической активности мезофильных аборигенных сообществ хемолитотрофных микроорганизмов в ходе окисления сульфидной руды кобальт-медно-никелевого месторождения Шануч / О.О. Левенец, Т.С. Хайнасова, М.А. Суханова // Актуальные аспекты современной микробиологии: материалы IV молодежной школы-конференции с международным участием / Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН. М.: МАКС Пресс, 2008. – С. 96–97.
29. Лисовский Г.Д. Кучное и подземное выщелачивание металлов / Г.Д. Лисовский, Д.П. Лобанов, В.П. Назаркин и др.. М.: Недра, 1982. 113 с.
30. Матвеева Л.А. Механизм разрушения алюмосиликатных и силикатных минералов // Кора выветривания, 1974. №14. С. 227-239.

31. Мезина О.А. Новый метод извлечения золота из руд и концентратов / О.А. Мезина, Н.М. Теляков // Записки горного института, 2004. Т.159. № 2. С. 119-121.
32. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии / А.И. Нетрусов, М.А. Егорова, Л.М. Захарчук. и др. М.: Академия, 2005. 608 с.
33. Низаметдинов Ф.К., Бесимбаева О.Г., Ожигин С.Г., Родина Е.Н. Инструментальные наблюдения за состоянием насыпных ограждающих дамб // Тр. Университета. КарГТУ. -2002. - № 4. - С. 36-41.
34. Отраслевой портал горно-металлургической промышленности «Metal Mining info» <http://metalmininginfo.kz/archives/3224>
35. Официальный сайт министерства природных ресурсов и экологии Ростовской области (минприродыро.рф) является сетевым изданием, учрежденным министерством природных ресурсов и экологии Ростовской области для обнародования официальной информации.
36. Патент РФ 2432409 Способ извлечения металлов из силикатных никелевых руд / Л.Н. Крылова, Э.В. Адамов, Е.А. Ким; заявл. 22.03.2010; опубл. 27.10.2011.
37. Патент РФ 2478127 Способ извлечения металлов из силикатных никелевых руд / В.Д. Стародубцева, Е.Б. Баланцева, Е.А. Ким и др.; заявл. 26.01.2012; опубл. 27.03.2013.
38. Патент RU 2367691 С1, 20.09.2009; Фомченко, Бирюков, 2009; Славкина и др., 2002; Palencia et al., 2002).
39. Питер В.А. Установка ВЮХ Кокпатаса / В.А. Питер, И.Ш. Рашидов, Й.В. Оливиер и др. // Горный вестник Узбекистана, 2008. №1(34).
40. Плаксин И.Н. Взаимодействие сурьмяных и мышьяковых минералов с цианистыми растворами при извлечении золота / И.Н. Плаксин, М.Д. Ивановский. М.: Metallurgizdat, 1940. 125 С. 409-425.
41. Польшкин С.И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. М.: Недра, 1987. 428 с.
42. Польшкин С. И., Адамов Э. В., Панин В. В. Биоготехнология металлов. М.: Недра, 1985. 243 с.
43. Польшкин С. И., Адамов Э. В., Панин В. В. Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. М.: Недра, 1982. 286 с.
44. Разумов К.А., Перов В.А. Проектирование обогатительных фабрик. Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М., Недра, 1982. – 518 с.
45. Ребриков Д.В. ПЦР в реальном времени: монография / Д.В. Ребриков, Г.А. Саматов, Д.Ю. Трофимов и др. М.: Бином, 2009. 216 с.
46. Руководящие принципы обеспечения безопасности и надлежащая практика для хвостохранилищ (2014) ЕЭК ООН. Нью Йорк и Женева, 34 стр.
47. Сидякина Г.Г. Минералого-Технологические типы 121 медьсодержащих руд в вулканитах Волыни и особенности их

биовыщелачивания / Г.Г. Сидякина, Т.В. Носальская // Минерал журнал, 2008. №4. С. 91-96.

48. Синельникова Н.В. Гидрометаллургия меди и никеля / Н.В. Синельникова, С.Н. Макарова, В.И. Береговский и др. М.: Цветметинформация, 1976. 62 с.

49. Совмен В.К. Переработка золотоносных руд с применением бактериального окисления в условиях Крайнего Севера / В.К. Совмен, В.Н. Гуськов, А.В. Белый. Новосибирск: Наука, 2007. 144 с.

50. Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017) : материалы Междунар. науч. конф., Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 452 с.

51. Соколова Г. А., Каравайко Г. И., Физиология и геохимическая деятельность тионовых бактерий, М., 1964.

52. Справочник по проектированию рудных обогатительных фабрик: В 2 кн. / Редкол.: О.Н. Тихонов и др. – Кн.1 / В.Ф. Баранов, П.С. Вольфсон, П.И. Круппа и др. – М.: Недра, 1988.– 374 с.

53. Справочник по проектированию рудных обогатительных фабрик: В 2 кн. / Редкол.: О.Н. Тихонов и др. – Кн.2 / Г.И. Адамов, В.Ф. Баранов, Б.П. Бутусов и др. – М.: Недра, 1988. – 341 с.

54. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы, испытания обогатимости, контроль и автоматика / Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1983. –376 с.

55. Султанбеков А.А. Бактериально-химическое выщелачивание цветных металлов // Вестник Казахского национального 123 исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, 2011. №1. С. 83-86.

56. Талалай А.Г., Глушкова Т.А., Макаров А.Б. и др. // Рос. геофиз. журн. 1998. № 9/10. С. 65-74.

57. Талалай А.Г., Макаров А.Б., Зобнин Б.Б. // Изв. вузов. Горный журнал. 1997. № 11/12. С. 20-36.

58. Тупикина О.В., Рассулов В.А., Кондратьева Т.Ф. Особенности окисления пиритов разными микроорганизмами // Микробиология. - 2009. - Т.78, №2. - С. 197-201.

59. Турысбекова Г.С. «Методы исследования золотосодержащих руд», 1994 г., 58стр.

60. Турысбекова Г.С. «Технология бактериального выщелачивания», Алматы, 2014г., 35 стр.

61. Турысбекова Г.С., Меретуков М.А., Бектай Е.К. Золото: Инновации в химии и металлургии. Алматы, 2015 г. 632 стр

62. Трухин Ю.П. Исследование кинетики и механизма биовыщелачивания сульфидной Co-Cu-Ni руды в периодическом режиме / Ю.П. Трухин, Т.С. Хайсанова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2011. № 10. С. 111-117.

63. Уманский, А. Б. Гидрометаллургическая технология переработки отвалов серпентинита с выделением никелевого концентрата // 2012.— С. 419–422.
64. Фомченко Н.В. Двухстадийное бактериально-химическое окисление сульфидных концентратов золота и цветных металлов: дис. ... док. тех. наук: 03.01.06 / Фомченко Наталья Викторовна. М., 2012. 301 с.
65. Хамуда Ражаа Абдель Фаттах Ахмед Роль микроорганизмов в процессах выщелачивания золота из руд северных областей Казахстана: автореф. дис. ... док. философии (Ph.D): 03.01.06 / Хамуда Ражаа Абдель Фаттах Ахмед. Алматы, 2009. 31 с.
66. Хопунов Э.А., Гуляев Н.Д. Геохимические аспекты гидрометаллургии техногенного сырья // Изв. вузов. Горный журнал. Уральское горное обозрение. 1995. - № 10-12. - С. 153-160.
67. Чайников В.В., Крючкова Л.А. Практика использования техногенных ресурсов черной и цветной металлургии в России и за рубежом. М., 1994. 30 с.
68. Чантурия В.А., Корюкин Б.М. // Проблемы геотехнологии и недроведения: (Мельниковские чтения): Докл. междунар. конф. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. Т. 3. С. 26-34.
69. Чантурия В.А. Влияние мощных наносекундных импульсов на технологические свойства упорных золотосодержащих продуктов 127 и железистых кварцитов / В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, А.В. Зубенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2006. № 8. С. 50-62.
70. Черняк А. С., Сафронов А. Ю., Кашевский А. В. Биотехнология и бионеорганическая химия благородных металлов: состояние и перспективы // Матер. науч.-практ. конф. «Химия и хим. технология на рубеже тысячелетий» (Томск, март 2000): Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – Т. 1. – С. 169–172.
71. Яхонтова Л.К. Основы минералогии гипергенеза: Учеб. пособие / Л.К.Яхонтова, В.П.Зверева. Владивосток: Дальнаука, 2000. 331 с.
72. Brain D. Bioleaching and electrobioleaching of sulfide minerals, 2005.
73. Conway M.H. Sulfur's impact on the size of pressure oxidation autoclaves /M.H. Conway, D.C. Gale // JOM, 1990. №42. pp. 19-22.
74. Craven P. Alliance Copper: the Billiton-CODELCO strategy for commercializing copper bioleaching / P. Craven, P. Morales // Randol Copper Hydromet Roundtable, 2000. pp. 119-126.
75. Davey, G. Fine Grinding Applications Using the Metso Vertimill R Grinding Mill and the Metso Stirred Media Detritor (SMD) in Gold Processing, 2006. pp. 251-261.
76. d'Hughes P. Bioleaching of a cobaltiferous pyrite at 20% solids: a continuous laboratory-scale study / P. d'Hughes, P. Cezac, F. Bataglia et al. // Minerals engineering, 1999. pp. 167-176.
77. Domic E.M. A Review of the Development and Current Status of Copper Bioleaching Operations in Chile: 25 Years of Successful Commercial

Implementation / E.M. Domic, Douglas Rawlings E., Barrie Johnson D. et al. // *Biomining*, 2007. pp. 81-95.

78. Dominique Henri Roger Morin *Bioleaching of a Cobalt-Containing Pyrite in Stirred Reactors* / Dominique Henri Roger Morin, Patrick d'Hugues // *Biomining*, 2007. pp. 35-36.

79. Erasmus D. (2005) *The BIOXR Process Update 2005*.

80. Foucher S. Evolution of the bacterial population during the batch bioleaching of a cobaltiferous pyrite in a suspended-solids bubble column and comparison with a mechanically agitated reactor / S. Foucher, F. Battaglia-Brunet, P. d'Hugues et.al. // *Hydrometallurgy*, 2003. № 71. pp. 5-12.

81. Gericke M. Bioleaching of copper sulphide concentrate using extreme thermophilic bacteria / M. Gericke, A. Pinches // *Minerals engineering*. 1999. pp. 893-904.

82. Harvey T.J. *The GeoBiotics GEOCOATR Technology - Progress and Challenges* / T.J. Harvey, M. Bath // *Biomining*, 2007. pp. 97-112.

83. Jaakko A. Puhakka, Anna H. Kaksonen, Marja Riekkola-Vanhanen. *Heap Leaching of Black Schist* // 2007. —. — pp. 139-152.

84. Liu H.L. SEM and AFM images of pyrite surfaces after bioleaching by the indigenous *Thiobacillus thiooxidans* / H.L. Liu, Y.W. Chen, Y.W. Lan ed. al. // *Appl Microbiol Biotechnol*, 2003. №62. pp. 414-420.

85. Logan T.C. *Biooxidation of Sulfidic Gold- Bearing Ores* / T.C. Logan, T.S. Seal, J.A. Brierley // *Biomining*, 2007. pp. 113-138.

86. Norris P.R. *Acidophiles in bioreactor mineral processing* / P.R. Norris, N.P. Burton, N.A.M. Foulis // *Extremophiles*, 2000. №4. pp. 71-76.

87. Olson G. J., Brierley J. A., Brierley C. L. *Bioleaching review part B: Progress in bioleaching: applications of microbial processes by the minerals industries* // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 2003. – 63. – P. 249–257.

88. Rawlings, D. E. *Characteristics and adaptability of iron- and sulfuroxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates* // *Microbial Cell Factories*, 2005. Vol.4. №13.

89. Rhodes, M., WO 00/28099, May 18, 2000.

90. Rodriguez Y. *New information on the pyrite bioleaching mechanism at low and high temperature* / Y.Rodriguez, A.Ballester, M.L.Blazquez et al. // *Hydrometallurgy*. 2003. Vol.71. P.37-46.

91. Sand W. *(Bio) chemistry of bacterial leaching – direct vs indirect bioleaching* / W.Sand, T.Gehrke, P.-G.Jozsa, A.Schippers // *Hydrometallurgy*. 2001. Vol.59. P.159-175.

92. Schippers A. *Microorganisms involved in bioleaching and nucleic acid-based molecular methods for their identification and quantification* // *Microbial Processing of Metal Sulfides*. Springer Netherlands, 2007. C. 3-33 c.

93. Tributsch H. *Direct vs indirect bioleaching* // *Hydrometallurgy*. 2001. Vol.59. P.177-185.

94. Van Aswegen P.C. The BIOX™ process for the treatment of refractory gold concentrate / P.C. Van Aswegen, J Van Niekerk, W. Olivier // *Biomining*, 2007. pp. 1-35.
95. VAN NIEKERK Recent advances in BIOX® technolog. 2009.

## Приложение А оттиски опубликованных статей



# ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКА В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Международный научный журнал

№6 2020  
Vol. 70

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС  
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ  
**Science Index** 

 НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
**LIBRARY.RU**





4.Paramonova L.G. Dysgraphia: diagnostics, prevention, correction. – SPb.: CHILDHOOD-PRESS, 2006.

5.Rostova N.N. About preparation for school of children with special needs in development and behavior. Speech therapy in kindergarten.- 2008.№ 1(26).

УДК 669.334.7

**Исследование бактериального выщелачивания медьсодержащих отвальных хвостов**

**Investigation of bacterial leaching of copper-containing tailings**

**Авторы:** Турысбекова Гаухар Сейтхановна – Республика Казахстан, г. Алматы, Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени К.И. Сатпаева, профессор, кандидат технических наук; Байбатша Адильхан Бекдилдаулы – Республика Казахстан, г. Алматы, Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени К.И. Сатпаева, профессор, доктор геолого-минералогических наук; Еркин Калдыбайулы Бектай – Республика Казахстан, г. Алматы, Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени К.И. Сатпаева, профессор, кандидат технических наук; Тажитдин Абдумалик Абдужамалулы – Республика Казахстан, г. Алматы, Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени К.И. Сатпаева, магистрант

**Authors:** Turysbekova Gauhar Seytkhanovna – Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakh national Technical University named after K.I. Satpaev, Professor, PhD in technical Sciences; Baybatsha Adilkhan Bekdildauly – Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakh national Technical University named after K.I. Satpaev, Professor, doctor of geological-mineralogical Sciences; Erkin Kaldybayuli Bektai – Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakh national Technical University named after K.I. Satpaev, Professor, PhD in technical Sciences; Tazhitdin Abdumalik Abdujamaluly – Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakh national Technical University named after K.I. Satpayev, undergraduate

**Аннотация:** Проведены исследования по разработке технологии переработки медьсодержащих хвостов с низким содержанием меди с помощью бактериально-химического выщелачивания.

Результаты исследований показали возможность снижения содержания меди до 0,05 %Cu при извлечении 80%.

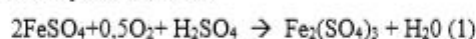
**Annotation:** Research has been conducted to develop a technology for processing copper-containing tailings with a low copper content using bacterial-chemical leaching.

The results of research have shown the possibility of reducing the copper content to 0.05 %Cu when extracting 80%.

**Ключевые слова:** выщелачивание, бактериальное выщелачивание, медь, хвосты, A.Ferrooxidans

**Keywords:** leaching, bacterial leaching, copper, tailings, A. Ferrooxidans

Различают два основных механизма бактериального окисления сульфидов: косвенный и прямой. Тионовые бактерии являются хемоавтотрофами, то есть единственный источник энергии для их жизнедеятельности – процессы окисления закисного железа, сульфидов различных металлов и элементарной серы. Эта энергия расходуется на усвоение углекислоты выделяемой из атмосферы или из руды. Получаемый углерод идет на построение клеточной ткани бактерий. *A.Ferrooxidans* окисляют сульфидные минералы до сульфатов прямым и косвенным путем. Косвенный механизм окисления сульфидов металлов протекает по следующей схеме:



Прямой механизм окисления сульфидов основан на прикреплении бактерий к сульфидам и за счет процессов во внеклеточном поверхностном слое происходит окисление сульфидов.



Рис. 1. Контактное выщелачивание пирита бактериями

В практике кучного выщелачивания при биоокислении куча руды и отвалов может генерировать высокую температуру внутри ее в результате окисления сульфидов. При большом содержании сульфидов можно применять управление кучным выщелачиванием для поддержания температуры за счет регулирования биологической активности применяемой культуры бактерий и максимизации сохранения тепла в куче.

При проведении исследований использовали среду 9 К (Сильвермана и Леандрена). Концентрация бактерий в растворе составляла  $10^6$  кл/мл, что позволило достижение оптимума биообработки материала. Для проведения БВ выращивали биомассу бактерий *A.Ferrooxidans* в течение 5 суток. Питательная среда *A.Ferrooxidans* состоит из  $\text{FeSO}_4$  - 5 г/л,  $\text{NH}_4\text{SO}_4$  - 1,5 г/л,  $\text{MgSO}_4$  - 0,5 г/л,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  - 0,5 г/л,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - 1 г/л. Агитационное бактериальное выщелачивание хвостов проводили на пробе массой 200 г при соотношении Т:Ж = 1:4, температура 25 °С, 250 об/мин. Промывка образца  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1%) + бактериальное вскрытие. По 200 г пробы выщелачивали в 1000 мл раствора, содержащего до 10 г/л серной кислоты. После кислотной обработки провели бактериальное выщелачивание. Бактериальное

выщелачивание проводили в течение 120 часов бактериальным раствором *A.Ferrooxidans*. Содержание трехвалентного железа  $Fe^{3+}$  составляло 3 г/л. Выщелачивание проводили при  $T=25^{\circ}C$ ,  $T:Ж=1:4$ . Используемые микроорганизмы адаптированы к данной пробе для проведения эффективного биоокисления. Применяли температурный режим при  $25^{\circ}C$  с использованием мезофильных бактерий.

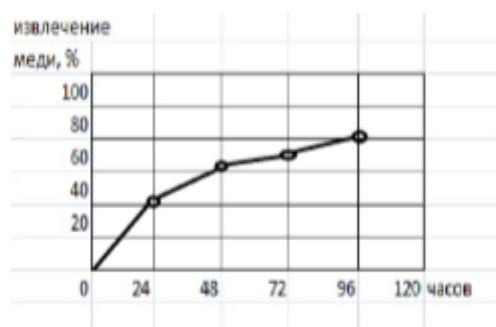


Рис. 2. Зависимость извлечения от времени биовыщелачивания

Как видно из рис. 2 биовыщелачивание меди в лабораторных исследованиях в течение 4 суток приблизились к 80 % при этом достигнуто снижение содержания меди с 0,15-0,25% до 0,05 % (0,02%). Результаты анализов исходной пробы хвостов показали, что промышленное значение имеет медь.









Работа выполнена в рамках проекта программно-целевого финансирования ВКО5233713 «Комплексное геологическое изучение недр для развития ресурсной базы и разработки новых источников рудного сырья Казахстана».

#### Список литературы:

1. Турысбекова Г.С. «Технология бактериального выщелачивания», Алматы, 2014 г., 35 с.
2. Турысбекова Г.С., Меретуков М.А., Бектай Е.К. «Золото: Инновации в химии и металлургии», Алматы, 2015г, 632с.
3. Байбатша А.Б. Минералогия хвостов Жезказганской обогатительной фабрики. Алматы, КазНТУ, 2018, 160 с.
4. Бектай Е.К., Турысбекова Г.С., Меретуков М.А., Бектаев М.Е. «Природные наночастицы и наноструктуры». Алматы, 2018 г. 600 с.

#### List of references:

1. Turysbekova G.S. "Technology of bacterial leaching", Almaty, 2014, 35 p.
2. Turysbekova G.S., Meretukov M.A., Bektay E.K. "Gold: Innovations in chemistry and metallurgy", Almaty, 2015, 632c.
3. Baibatsha A.B. Mineralogy of tails of the Zhezkazgan processing plant. Almaty, KazNTU, 2018, 160 p.
4. Bektay E.K., Turysbekova G.S., Meretukov M.A., Bektaev M.E. "Natural nanoparticles and nanostructures". Almaty, 2018, 600 p.

- Факторы операторской деятельности, задействованные при выполнении задач.....
-  Малышева Ирина Станиславовна *Российская Федерация, г. Томск, Томский государственный педагогический университет, магистрант*
- Профилактика дисграфии у старших дошкольников с ФФНР.....
-  Турысбекова Гаухар Сейтхановна *Республика Казахстан, г. Алматы, Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени К.И. Сатпаева, профессор, технических наук; Байбатша Адильхан Бекдилдаулы Республика Казахстан, г. Казахстанский Национальный Исследовательский Технический Университет имени К.И. профессор, доктор геолого-минералогических наук; Еркин Калдыбайулы Бектай Казахстан, г. Алматы, Казахский Национальный Исследовательский Технический У имени К.И. Сатпаева, профессор, кандидат технических наук; Тажибдин Абдужамалулы Республика Казахстан, г. Алматы, Казахский Национальный Исследо Технический Университет имени К.И. Сатпаева, магистрант*
- Исследование бактериального выщелачивания медьсодержащих отвальных хвостов...
-  Нагорная Маргарита Романовна *Российская Федерация, г. Москва, Российский Государственный Гуманитарный Университет, магистрант*
- Экспансия иноязычных заимствований в тексты СМИ. Плюсы и минусы.....
-  Кондратьева Алена Викторовна *Российская Федерация, г. Москва, Московский юридический университет, магистрант*
- Оказание адвокатом квалифицированной юридической помощи (по материалам г коллегий Республики Крым).....
-  Кондратьева Алена Викторовна *Российская Федерация, г. Москва, Московский юридический университет, магистрант*
- Рекомендации по совершенствованию правового регулирования защиты прав административных правоотношений.....
-  Ременцов Александр Владимирович *Российская Федерация, г. Волгодонск, технологий (филиал) ФГБОУ ВО «ДГТУ» в г. Волгодонске Ростовской области преподаватель кафедры «Технический сервис и информационные технологии»*
- Исследование влияния электрохимической поляризации на механическую обработ диэлектрических материалов.....
-  Ременцов Александр Владимирович *Российская Федерация, г. Волгодонск, технологий (филиал) ФГБОУ ВО «ДГТУ» в г. Волгодонске Ростовской области преподаватель кафедры «Технический сервис и информационные технологии»*
- Метод непрерывного экспресс-мониторинга узла трения в процессе эксплуатации.....
-  Терещенко Владимир Васильевич *Республика Беларусь, г. Минск, Академия управ*



-  Nikonova Julia Valerievna *Russian Federation, Moscow, Moscow University of Financial Economics*  
*master's degree*  
 Directions for improving the legislative regulation of local government.....
-  Malkarova Inna Arturovna *Russian Federation, Nalchik, Kabardino-Balkarian State University*  
*specialization "General medicine", student*  
 Human immunodeficiency virus: pathogenicity and its containment.....
-  Usanov Dmitry Vyacheslav *Russian Federation, Moscow, Moscow Polytechnic University*  
*degree*  
 Factors of operator activity involved in performing complex tasks.....
-  Malysheva Irina Stanislavovna *Russian Federation, Tomsk, Tomsk state pedagogical university*  
*master's degree*  
 Prevention of dysgraphia in high school children with FFNR.....
-  Turysbekova Gauhar Seytkhanovna *Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakh national Technical University named after K.I. Satpaev, Professor, PhD in technical Sciences; Baybatsl Bekdildauly Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakh national Technical University named after K.I. Satpaev, Professor, doctor of geological-mineralogical Sciences; Erkin Kaldybayuli Bektai Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakh national Technical University named after K.I. Satpaev, Professor, doctor of technical Sciences; Tazhitdin Abdumalik Abdujamaluly Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakh national Technical University named after K.I. Satpayev, undergraduate*  
 Investigation of bacterial leaching of copper-containing tailings.....
-  Nagomaya Margarita Romanovna *Russian Federation, Moscow, Russian State University of Humanities*  
*Humanities, master's degree*  
 Expansion of foreign words in texts of mass media. Advantages & disadvantages.....
-  Kondratieva Alena Viktorovna *Russian Federation, Moscow, Moscow University of Financial Economics*  
*master's degree*  
 The provision of qualified legal assistance by an attorney (based on materials of the bar as the Republic of Crimea).....
-  Kondratieva Alena Viktorovna *Russian Federation, Moscow, Moscow University of Financial Economics*  
*master's degree*  
 Recommendations on improving the legal regulation of the protection of the rights of administrative legal relations.....
-  Rementsov Alexander Vladimirovich *Russian Federation, Volgogradsk, Institute of Technical Service and Information Technology (branch), FSBEI HE "DSTU" in Volgogradsk, Rostov Region, Senior Lecturer, Doctor of Technical Sciences*  
 Study of the effect of electrochemical polarization on the machining of brittle materials.....