

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра «Металлургия и обогащение полезных ископаемых»

Бакытжанұлы Қайыржан

«Исследование и разработка технологии бактериального выщелачивания медно-
молибденовой руды при обогащении сульфидных руд Актогайского месторождения»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ОП 7М07226 – Обогащение полезных ископаемых

Алматы 2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Горно-металлургический институт им А.О.Байконурова

УДК 669.053.772

На правах рукописи

Бақытжанұлы Қайыржан

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации

Исследование и разработка технологии
бактериального выщелачивания медно-
молибденовой руды при обогащении
сульфидных руд Актогайского
месторождения

Направление подготовки

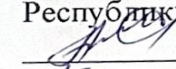
ОП 7М07226 – «Обогащение полезных
ископаемых»

Научный руководитель

Кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Металлургии и
обогащения полезных ископаемых», НАО
«Казахский национальный исследовательский
университет имени К.И.Сатпаева»


 Телков Ш.А.
«09» 01 2026 г.

Старший научный сотрудник лаборатории
благородных металлов, доктор PhD, РГП на
ПХВ «Национальный центр по комплексной
переработке минерального сырья
Республики Казахстан»

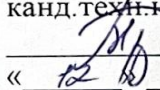
 Алтынбек Ш.Ч.
«15» 01 2026 г.

Норм контроль

Ведущий инженер кафедры МиОПИ,
магистр техн.наук

 Таймасова А.Н.
«12» 01 2026 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующая кафедрой МиОПИ,
канд.техн.наук, ассоц профессор
 Барменшинова М.Б.

«12» 01 2026 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
Горно-металлургический институт
им. О.А. Байконурова

Алматы 2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Горно-металлургический институт им А.О.Байконурова
7М07226 – «Обогащение полезных ископаемых»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующая кафедрой МиОПИ,
канд. техн. наук, ассоц. профессор
Барменшинова М.Б.
« 12 » 01 2026 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Бақытжанұлы Қайыржан

Тема Исследование и разработка технологии бактериального выщелачивания медно-молибденовой
руды при обогащении сульфидных руд Актогайского месторождения

Утверждена приказом Ректора Университета №133-П/Ө от «28» марта 2024 г.

Срок сдачи законченной диссертации « 12 » января 2026 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Медно-молибденовый сульфидная руда
месторождения Актогай

- а) анализ геолого-структурных, минералогических и технологических особенностей медно-молибденовых руд Актогайского месторождения с оценкой перспектив их промышленной переработки.
- б) исследование закономерностей протекания процессов бактериального выщелачивания сульфидных руд, включая влияние физико-химических параметров среды и активности микроорганизмов.
- в) разработка и оптимизация технологической схемы бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд в условиях Актогайского месторождения.
- г) вопросы безопасности жизнедеятельности и охраны труда при проведении лабораторных и опытно-промышленных исследований, а также при промышленном внедрении технологии.
- д) расчет экономической эффективности внедрения разработанной технологии бактериального выщелачивания и оценка ее экологической устойчивости.
- е) приложения, содержащие результаты аналитических, экспериментальных и расчетных исследований, а также вспомогательные материалы (графики, таблицы, схемы, спецификации).

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Рекомендуемая основная литература:

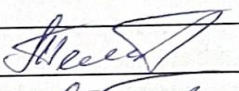
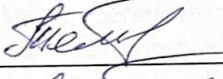

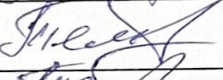
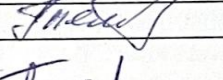
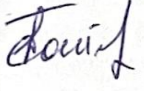
- 1 KAZ Minerals. Annual Report 2023. Production and Reserves Data. – London, 2023.
- 2 Rawlings D. E., Johnson D. B. The microbiology of biomining: development and optimization of mineral-oxidizing microbial consortia // Microbiology. – 2022. – V. 168, № 3. – P. 189–206.
- 3 Kenjalyev B. K. et al. Development of bacterial leaching technology for copper ores in Kazakhstan // Mining Journal of Kazakhstan. – 2023. – № 2. – P. 89–94.
- 4 Watling H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides — a review // Hydrometallurgy. – 2015. – V. 157. – P. 81–108.
- 5 Ghorbani Y., Franzidis J. P., Petersen J. Heap bioleaching of copper: Recent developments and future outlook // Minerals Engineering. – 2021. – Vol. 160. – P. 213–220.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Введение	11.10.2025	выпол.
Аналитический обзор литературы	10.11.2025	выпол.
Методика исследований	12.12.2025	выпол.
Экспериментальная часть	05.01.2026	выпол.
Заключение	09.01.2026	выпол.

Подписи

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

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Введение	Телков Ш.А. Кандидат технических наук, доцент, профессор	11.10.2025	
Аналитический обзор литературы		10.11.2025	
Методика исследований		12.12.2025	
Экспериментальная часть		06.01.2026	
Заключение		09.01.2026	
Норм контролер	Таймасова А.Н. Ведущий инженер кафедры МиОПИ, магистр техн.наук	12.01.2026.	

Научный руководитель

Задание принял к исполнению обучающийся

Дата



Телков.Ш.А



Бақытжанұлы.Қ

«12» 01 2026г

АННОТАЦИЯ

Диссертационная работа посвящена исследованию и разработке технологии бактериального выщелачивания медно-молибденовой руды Актогайского месторождения. Цель исследования – повышение эффективности извлечения меди и молибдена за счет применения биотехнологических методов переработки, обеспечивающих снижение затрат и экологической нагрузки. В работе изучены геолого-минералогические особенности месторождения, проведены эксперименты с использованием культур *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*, определены оптимальные параметры процесса и предложена технологическая схема биовыщелачивания. Отличительной особенностью исследования является практическая направленность и возможность промышленного применения разработанной технологии при переработке бедных сульфидных руд Казахстана.

АНДАТПА

Диссертациялық жұмыс Актоғай кен орнының мыс-молибден кенін бактериялық шаймалау технологиясын зерттеуге және әзірлеуге арналған. Зерттеудің мақсаты-шығындар мен экологиялық жүктемені азайтуды қамтамасыз ететін өндеудің биотехнологиялық әдістерін қолдану арқылы мыс пен молибден алудың тиімділігін арттыру. Жұмыста кен орнының геологиялық-минералогиялық ерекшеліктері зерттелді, *Acidithiobacillus ferrooxidans* және *Acidithiobacillus thiooxidans* дақылдарын қолдана отырып эксперименттер жүргізілді, процестің оңтайлы параметрлері анықталды және биологиялық сілтілеудің технологиялық схемасы ұсынылды. Зерттеудің айрықша ерекшелігі-Қазақстанның кедей сульфидті кендерін өндеу кезінде әзірленген технологияны өнеркәсіптік қолданудың практикалық бағыты мен мүмкіндігі.

ANNOTATION

The thesis is devoted to the research and development of bacterial leaching technology for copper-molybdenum ore from the Aktogay deposit. The aim of the study is to increase the efficiency of copper and molybdenum extraction through the use of biotechnological processing methods that reduce costs and environmental impact. The geological and mineralogical features of the deposit were studied, experiments were conducted using *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* cultures, optimal process parameters were determined, and a technological scheme for bio-leaching was proposed. A distinctive feature of the research is the practical orientation and the possibility of industrial application of the developed technology in the processing of poor sulfide ores in Kazakhstan.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	8
1	Аналитический обзор литературных источников	12
1.1	Геологическая характеристика Актогайского месторождения	12
1.2	Технологии переработки медно-молибденовых руд	15
1.3	Современные методы выщелачивания сульфидных руд	18
1.4	Микроорганизмы, применяемые в биовыщелачивании	23
1.5	Факторы, влияющие на эффективность бактериального выщелачивания	24
1.6	Перспективы применения бактериального выщелачивания в Казахстане	28
1.7	Анализ литературных источников и постановка задач исследования	30
2	Методика исследований	33
2.1	Объект и цель экспериментальных исследований	33
2.2	Подготовка пробы и характеристика исходного материала	35
2.3	Изучение гранулометрического состава	37
2.4	Биотехнологическая часть исследования	40
2.5	Лабораторные опыты по биовыщелачиванию	42
2.6	Методы аналитического контроля	45
3	Технологические исследования	49
3.1	Изучение кинетики бактериального выщелачивания	49
3.2	Влияние гранулометрического состава на процесс выщелачивания	51
3.3	Исследование влияния концентрации бактериальной культуры	53
3.4	Оптимизация параметров технологического процесса	55
3.5	Моделирование процесса бактериального выщелачивания	57
3.6	Рекомендуемая технологическая схема бактериального выщелачивания	58
3.7	Оценка экономической эффективности технологии	61
	Перечень терминов. Перечень сокращений	65
	Заключение	67
	Список использованной литературы	71
	Приложение А	76
	Приложение Б	79
	Приложение В	81

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования определяется необходимостью повышения эффективности переработки медно-молибденовых руд в условиях истощения богатых запасов и перехода к разработке низкосортных и труднообогатимых руд. Современное развитие минерально-сырьевого комплекса Республики Казахстан требует внедрения инновационных и экологически безопасных технологий, обеспечивающих рациональное использование природных ресурсов и устойчивое функционирование предприятий горно-металлургического профиля. Одним из таких направлений является применение биотехнологических методов, основанных на использовании микроорганизмов, способных извлекать металлы из минерального сырья. Их внедрение позволяет не только повысить экономическую эффективность переработки, но и значительно сократить техногенное воздействие на окружающую среду.

Приоритетным направлением экономической политики Республики Казахстан является развитие минерально-сырьевого комплекса, обусловленное его значительной долей в структуре валового внутреннего продукта и существенным вкладом в экспортные поступления. Наблюдаемая в последние годы тенденция к деградации качества добываемого сырья, проявляющаяся в снижении содержания меди и молибдена в руде, актуализирует разработку и внедрение технологий, направленных на повышение эффективности извлечения металлов при оптимизации энергетических и реагентных затрат.

Актогайское месторождение, одно из крупнейших в Казахстане и мире по запасам меди и молибдена, сталкивается с серьезными технологическими вызовами. Расположенное в восточной части страны, в районе хребта Актогай, оно содержит более 1,4 миллиарда тонн руды со средним содержанием меди 0,37-0,42%. Однако, несмотря на огромные запасы, обогащение руды осложняется равномерным распределением молибдена в виде мелкодисперсных включений в медных сульфидах, что требует применения специальных технологий. Месторождение, разрабатываемое KAZ Minerals, включает участки добычи окисленных и сульфидных руд.

С увеличением доли бедных руд эффективность традиционных методов переработки, в частности флотации и пирометаллургических процессов, значительно снижается. Флотационные схемы требуют тонкого измельчения руды и больших объемов реагентов, что повышает себестоимость концентрата и приводит к потерям ценных компонентов в хвостах. Пирометаллургические процессы характеризуются высокими энергетическими затратами и сопровождаются выбросами сернистых соединений, что не соответствует современным экологическим стандартам. Поэтому все более значимой становится разработка альтернативных технологий, основанных на принципах биогидрометаллургии, которые позволяют переводить металлы в раствор при помощи микроорганизмов.

Бактериальное выщелачивание представляет собой процесс, при котором хемолитотрофные микроорганизмы используют энергию окисления соединений железа и серы для поддержания жизнедеятельности, в результате чего происходит разрушение сульфидных минералов и высвобождение ионов меди и молибдена. Основными биологическими агентами в этих реакциях являются бактерии родов *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum* и *Sulfobacillus*. Их активность напрямую зависит от кислотности среды, температуры, окислительно-восстановительного потенциала и концентрации ионов железа.

Мировая практика подтверждает высокую эффективность применения технологии бактериального выщелачивания. Она внедрена на крупнейших месторождениях, таких как Escondida и Chuquibambilla в Чили, Talvivaara в Финляндии, Mt. Gordon в Австралии. Эти примеры показывают, что при оптимальных параметрах среды можно достигать степени извлечения меди свыше восьмидесяти процентов при низких капитальных и эксплуатационных затратах. В Казахстане данный метод пока находится на стадии научно-исследовательской разработки, однако эксперименты, проводимые отечественными и зарубежными специалистами, демонстрируют его значительный потенциал для переработки бедных и техногенных руд Центрального и Восточного Казахстана.

Научная и практическая актуальность темы исследования заключается в необходимости разработки технологии бактериального выщелачивания, адаптированной к геолого-технологическим особенностям Актогайского месторождения. Внедрение такой технологии позволит вовлечь в переработку низкосортные запасы, снизить нагрузку на окружающую среду, уменьшить использование химических реагентов и повысить рентабельность производственных процессов. Данное направление соответствует стратегическим задачам Республики Казахстан в области развития инноваций, повышения энергоэффективности и перехода к устойчивому использованию природных ресурсов.

Целью настоящего исследования является изучение закономерностей протекания процессов бактериального выщелачивания медно-молибденовых сульфидных руд и разработка эффективной технологии, обеспечивающей повышение степени извлечения меди и молибдена из минерального сырья Актогайского месторождения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- провести аналитический обзор литературных источников по геологическим, технологическим и биотехнологическим аспектам переработки медно-молибденовых руд;
- изучить геологическое строение, минеральный и химический состав руд Актогайского месторождения, а также определить особенности распределения медных и молибденовых минералов;

- проанализировать существующие технологии переработки сульфидных руд и выявить их технологические и экономические ограничения применительно к местным условиям;
- определить биологические агенты, наиболее эффективные для выщелачивания медных и молибденовых минералов, и провести лабораторные исследования с использованием культур *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*;
- изучить влияние гранулометрического состава, кислотности, окислительно-восстановительного потенциала и температуры на кинетику бактериального выщелачивания;
- разработать и апробировать лабораторную технологическую схему бактериального выщелачивания, адаптированную к условиям Актогайского месторождения;
- выполнить моделирование процесса и определить оптимальные технологические параметры, обеспечивающие повышение степени извлечения меди и молибдена;
- провести оценку экономической эффективности и экологической устойчивости разработанной технологии в условиях действующего производства.

Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей протекания биохимических процессов бактериального выщелачивания применительно к медно-молибденовым сульфидным рудам Актогайского месторождения. В ходе исследования предполагается определить взаимосвязь между параметрами среды и активностью микроорганизмов, установить оптимальные условия выщелачивания и разработать инженерно-технологические решения, направленные на повышение извлечения металлов при снижении себестоимости переработки.

Теоретическую основу исследования составляют современные представления о механизмах окислительно-восстановительных реакций в сульфидных системах, труды отечественных и зарубежных ученых в области биогидрометаллургии, а также методы физико-химического и микробиологического анализа. Методологическая база основана на сочетании лабораторных экспериментов, математического моделирования и аналитических методов, обеспечивающих достоверность полученных результатов.

Практическая база исследования включает данные лабораторных опытов, проведенных с использованием проб руд Актогайского месторождения, а также результаты промышленных наблюдений и аналитических отчетов предприятий группы KAZ Minerals. Результаты работы могут быть применены при проектировании технологических схем обогащения и переработки низкосортных медно-молибденовых руд, разработке новых биотехнологических процессов и в учебном процессе высших учебных заведений горно-металлургического профиля.

Необходимость выполнения работы обусловлена стратегическими задачами Казахстана по технологической модернизации горно-металлургического комплекса, внедрению малоотходных технологий и повышению экологической устойчивости производственных процессов. Реализация разработанной технологии бактериального выщелачивания создаст научную и производственную основу для промышленного освоения бедных руд и укрепит позиции Казахстана на мировом рынке цветных металлов.

1 Аналитический обзор литературных источников

1.1 Геологическая характеристика Актогайского месторождения

Актогайское месторождение относится к числу крупнейших медно-молибденовых объектов Казахстана и занимает особое место в структуре минерально-сырьевой базы страны [1]. Оно расположено в восточной части Центрального Казахстана, на юго-востоке Карагандинской области, приблизительно в 250 километрах к юго-востоку от города Балхаш [2]. Месторождение входит в Балхашскую меднорудную провинцию, которая отличается значительным развитием интрузивных пород и интенсивным проявлением медно-порфирового оруденения [3, с. 14–19].

Геологические данные АО «KAZ Minerals» и Института геологических наук им. К.И. Сатпаева указывают на то, что рудные тела приурочены к Актогайскому интрузиву. Этот интрузив представлен диоритами, гранодиоритами и кварцевыми диоритами, которые были нарушены дайками порфировых пород [4]. Месторождение обладает порфировым строением, что является типичной чертой крупных медных объектов. В таких объектах оруденение развивается в субвулканических телах и вмещающих породах, претерпевших гидротермальные изменения.

В структурно-тектоническом отношении район расположен в северной части Центрально-Казахстанского поднятия, характеризующегося сочетанием разломов северо-западного и северо-восточного направлений. Именно вдоль этих тектонических зон наблюдается развитие рудных тел, что подтверждается результатами геофизических исследований [5, с. 27]. Зона минерализации протягивается более чем на 2,5 километра при ширине до 1,2 километра, что делает месторождение одним из самых протяженных в регионе.

Минеральная зональность выражена достаточно четко. Центральная часть представлена кварц-серицитовой зоной с высоким содержанием халькопирита и борнита, в то время как периферийные области сложены пропилитами с повышенным содержанием пирита и вторичных силикатов. Характер распределения рудных минералов отражает развитие типичной для порфировых систем зональности от меди и молибдена в центре к железу и сере на периферии [6].

Геологические исследования также подчеркивают тесную пространственную связь между зонами, богатыми рудной минерализацией, и кварцевыми жилами, содержащими молибденит (MoS_2). Сам молибденит обнаруживается в виде тонких включений в халькопирит и кварцевые прожилки, что характерно для минералообразования на поздней гидротермальной стадии [7].

Следует отметить, что в пределах месторождения выделяются две основные рудные зоны - окисленная и сульфидная. Верхняя часть разреза мощностью около 120–150 м представлена окисленными рудами, в которых

медь находится преимущественно в виде малахита, азурита и куприта. Ниже располагается зона первичных сульфидных руд, являющихся главным промышленным объектом разработки. Именно для этой категории руд рассматривается возможность внедрения технологии бактериального выщелачивания, что подробно описано далее в работе и частично представлено в Приложении А.

Для характеристики химического состава исходных рудных материалов в таблице 1.1 приведены усредненные показатели по содержанию основных элементов в окисленных и сульфидных рудах Актогайского месторождения. Эти данные были получены в ходе лабораторных и аналитических исследований, проведенных специалистами KAZ Minerals и Института геологических наук им. К.И. Сатпаева [1, 4, 8].

Таблица 1.1 – Средний химический состав руд Актогайского месторождения (по данным KAZ Minerals и Института геологических наук им. К.И. Сатпаева)

Компонент	Окисленные руды, %	Сульфидные руды, %
Cu (медь)	0,37	0,41
Mo (молибден)	0,009	0,010
Fe (железо)	2,4	3,1
S (сера)	0,6	1,8
SiO ₂	62,3	59,8
Al ₂ O ₃	14,7	15,4
CaO	2,3	2,0
MgO	1,4	1,7
K ₂ O + Na ₂ O	4,9	4,5
Плотность, г/см ³	2,65	2,78
Примечание: Составлено автором на основе источников [1, 4, 8]		

Согласно представленным в таблице данным, сульфидные руды выделяются более высоким уровнем меди, серы и железа. Конкретно, содержание меди увеличивается с 0,37% в окисленных рудах до 0,41% в сульфидных, что напрямую связано с увеличением в них халькопирита и борнита. Почти трехкратное повышение содержания серы свидетельствует о доминировании сульфидных минеральных фаз, а рост железа подтверждает наличие пирита и магнетита. Наряду с этим, наблюдается уменьшение доли кремнезема с 62,3% до 59,8%, что является следствием гидротермальных преобразований исходных пород.

Тем не менее, как отмечают исследователи, структура рудного тела крайне неоднородна, что вызывает значительные колебания в содержании меди и молибдена даже в пределах одной технологической зоны [6, 8]. Например, в центральной части месторождения встречаются участки, где содержание меди достигает 0,6 %, тогда как на периферии оно снижается до

0,3 %. Аналогичная закономерность наблюдается и по молибдену, содержание которого варьирует от 0,007 до 0,012 %.

При рассмотрении гидрогеологических условий Актогайского месторождения следует подчеркнуть его расположение в зоне континентального климата. Этот климат, отличающийся малым количеством осадков, в сочетании с преобладанием напорных подземных вод [9], создает благоприятную среду для открытой разработки месторождения. Такая ситуация существенно снижает риск подтопления карьеров. Более того, ограниченное развитие грунтовых вод облегчает проведение исследований, связанных с кучным и бактериальным выщелачиванием, так как вероятность разбавления используемых растворов минимальна.

Важное значение имеет также структурно-литологический контроль оруденения. Согласно данным геофизических наблюдений, наибольшая концентрация рудных тел приурочена к пересечениям разломов северо-западного и северо-восточного направлений [10]. Эти зоны служили каналами для подъема гидротермальных растворов и формирования основных залежей меди и молибдена.

Современное промышленное освоение месторождения осуществляется открытым способом. Добытая руда поступает на дробильно-сортировочный комплекс, а затем на обогатительную фабрику, где применяется флотационная схема с использованием коллекторов и вспенивателей. Однако, как показывают технологические исследования, значительная часть меди и молибдена (до 20 %) остается в хвостах флотации [8, 11]. Это делает актуальным поиск альтернативных методов, включая биотехнологические подходы, позволяющие извлекать металлы из бедных и труднообогатимых руд при меньших затратах и экологических рисках.

Как показано в Приложении А, пространственная структура Актогайского рудного поля и его тектонические особенности создают благоприятные предпосылки для проведения экспериментов по биовыщелачиванию. Развитая сеть разломов, зон окисления и наличие сульфидных минералов обеспечивают доступ кислорода и растворов, что является необходимым условием для жизнедеятельности бактерий рода *Acidithiobacillus*.

Геолого-минералогическая оценка Актогайского месторождения подтверждает наличие сложной, но благоприятной природной базы для внедрения биогидрометаллургических технологий. Совокупность факторов – богатый минеральный состав, относительно низкое среднее содержание меди и молибдена, а также развитая зональность – делает Актогайское месторождение наиболее подходящим объектом для проведения всесторонних исследований по бактериальному выщелачиванию.

1.2 Технологии переработки медно-молибденовых руд

История переработки медно-молибденовых руд демонстрирует переход от исключительно высокотемпературных (пирометаллургических) методов к современным, комбинированным биогидрометаллургическим подходам. Долгое время основным методом обогащения была флотация, использующая разницу в поверхностных свойствах минералов. Этот метод был эффективен для богатых руд, но его результативность снизилась при работе с бедными и упорными типами руд.

Флотационный процесс для медно-молибденовых руд требует очень тонкого измельчения сырья (до 74 мкм), что является энергоемким. Кроме того, он характеризуется значительным потреблением реагентов, в частности, коллекторов, пенообразователей и депрессоров. Наиболее сложной задачей является разделение медного и молибденового концентратов, поскольку халькопирит и молибденит часто встречаются вместе. Из-за этого при флотации может теряться до 20-25% меди и около 10% молибдена, что снижает общую прибыльность [12, с. 35].

Помимо флотации, широкое распространение получили пирометаллургические методы, включающие плавку, конвертирование и огневое рафинирование. Однако для руд с низким содержанием меди и молибдена данные методы экономически нецелесообразны. Их применение оправдано лишь при переработке концентратов с содержанием меди выше 20 %, что требует предварительного обогащения. Кроме того, пирометаллургия сопровождается значительными выбросами диоксида серы и требует дорогостоящих систем газоочистки [13, с. 64].

В связи с этим особое внимание в последние десятилетия уделяется гидрометаллургическим и комбинированным методам переработки. Кислотное и аммиачное выщелачивание позволяют частично перевести медь и молибден в раствор, но кинетика химических реакций в сульфидных системах крайне медленная. В частности, при обычных условиях извлечение меди из халькопирита не превышает 40–45 % даже при длительном выщелачивании [14, с. 78]. Это связано с пассивацией поверхности минералов, образованием нерастворимых соединений серы и железа, а также ограниченной диффузией окислителя.

Плюс ко всему, исследователи отмечают, что комбинированные методы, основанные на совмещении флотации и последующего выщелачивания флотационных хвостов, позволяют более полно использовать минеральное сырье. Такие схемы внедряются на ряде предприятий Казахстана, в том числе на Балхашской обогатительной фабрике, где реализуется частичное выщелачивание низкосортных руд и переработка отходов [15, с. 22].

Как показано в таблице 1.2, сравнение основных технологий переработки медно-молибденовых руд демонстрирует существенные различия по параметрам извлечения, энергетическим затратам и экологической устойчивости.

Таблица 1.2 – Сравнительная характеристика технологий переработки медно-молибденовых руд

Показатель	Флотация	Гидрометаллургия	Биовыщелачивание
Извлечение меди, %	70–85	40–60	75–90
Извлечение молибдена, %	65–80	35–50	70–85
Энергозатраты, кВт·ч/т	25–40	15–25	10–18
Уровень загрязнения среды	Высокий	Средний	Низкий
Капитальные затраты	Высокие	Средние	Низкие
Сложность контроля процесса	Средняя	Высокая	Средняя
Возможность переработки бедных руд	Ограниченная	Ограниченная	Высокая
Примечание: Составлено автором на основе источников [14, 15, 17]			

Таблица подтверждает, что биовыщелачивание является эффективным методом извлечения металлов из бедных и труднообогатимых руд, таких как актогайские, благодаря сочетанию высокой степени извлечения, низких энергозатрат и незначительного экологического следа. Эффективность процесса определяется активностью бактерий, окисляющих сульфидные минералы. Наиболее часто используются *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*, обеспечивающие ускоренное окисление ионов железа и серы. Эти бактерии демонстрируют устойчивость к кислой среде и высоким концентрациям тяжелых металлов, что позволяет их применение в промышленных биореакторах при pH 1,8–2,2 и температуре 30–35 °С [16, с. 51].

Как показано на рисунке 1.1, технологическая схема переработки медно-молибденовых руд Актогайского месторождения включает несколько основных стадий, объединенных в единый производственный цикл.



Рисунок 1.1 – Обобщенная технологическая схема переработки медно-молибденовых руд

Примечание: Составлено автором на основе источников [16]

Согласно приведенной схеме, процесс начинается с добычи руды в карьере, после чего материал проходит стадии дробления и измельчения до требуемой крупности частиц. Затем следует флотация, в ходе которой происходит разделение медного и молибденового концентратов. Завершающие операции включают обезвоживание, сушку и транспортировку готового продукта.

Анализ схемы позволяет сделать вывод, что эффективность флотации во многом определяется степенью измельчения и правильным выбором реагентов. Для повышения полноты извлечения ценных компонентов на стадии флотации меди применяются собиратели на основе ксантогенатов, а для выделения молибдена - депрессоры пирита и медных минералов. Таким образом, представленный технологический цикл является основой действующего производства, однако в нем сохраняются потери металлов в хвостах до 10–15 %, что обосновывает необходимость внедрения дополнительных методов, включая биовыщелачивание.

Тем не менее, необходимо учитывать, что технологические схемы бактериального выщелачивания требуют строгого контроля параметров среды, в частности аэрации, температуры и состава питательного раствора. В противном случае активность бактерий снижается, что приводит к уменьшению скорости выщелачивания. Именно поэтому во многих странах, включая Чили, Финляндию и Китай, внедрение биотехнологий

сопровождается постоянным мониторингом параметров процесса и автоматизацией систем контроля [17, с. 28].

В международной практике наибольший интерес представляют такие проекты, как Escondida (Чили), Talvivaara (Финляндия) и Las Cruces (Испания), где бактериальное выщелачивание используется для извлечения меди и никеля из бедных руд. Применение данной технологии позволило снизить капитальные затраты на 30–40 % и увеличить общий коэффициент извлечения меди до 80–85 % [18, с. 109].

В Казахстане внедрение технологий биовыщелачивания находится на стадии пилотных исследований. Работы в этом направлении проводятся в Институте гидрометаллургии и в лабораториях Satbayev University, где показана высокая активность мезофильных штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans* в условиях, близких к реальным параметрам актогайских руд [19, с. 91]. Полученные результаты подтверждают возможность промышленного внедрения биотехнологических схем, особенно в рамках экологической модернизации предприятий KAZ Minerals.

В заключение следует отметить, что анализ существующих технологий показывает явное преимущество биовыщелачивания в переработке бедных медно-молибденовых руд. Данный метод соответствует принципам устойчивого развития и открывает новые перспективы для горно-металлургической отрасли Казахстана, что делает его предметом дальнейших экспериментальных и технологических исследований в последующих главах.

1.3 Современные методы выщелачивания сульфидных руд

Современный этап развития гидрометаллургии цветных металлов характеризуется переходом от традиционных химических процессов к более устойчивым и энергоэффективным методам. Одним из приоритетных направлений является интенсификация процессов выщелачивания сульфидных руд, составляющих значительную долю минерально-сырьевой базы меди и молибдена. Сульфидные минералы, такие как халькопирит (CuFeS_2), халькозин (Cu_2S), ковеллин (CuS), борнит (Cu_5FeS_4) и молибденит (MoS_2), отличаются высокой химической инертностью. Их растворение в кислых средах, в частности в растворах серной кислоты, протекает с низкой скоростью, что существенно снижает эффективность стандартных технологий выщелачивания. Кроме того, на поверхности частиц сульфидных минералов формируются пассивирующие слои, состоящие из элементарной серы, гидроксидов железа и других нерастворимых соединений, которые препятствуют дальнейшему окислительно-восстановительному взаимодействию и извлечению металлов [20, с. 47].

Для наглядности на рисунке 1.2 показана классификация современных методов выщелачивания сульфидных руд в зависимости от условий проведения процесса.

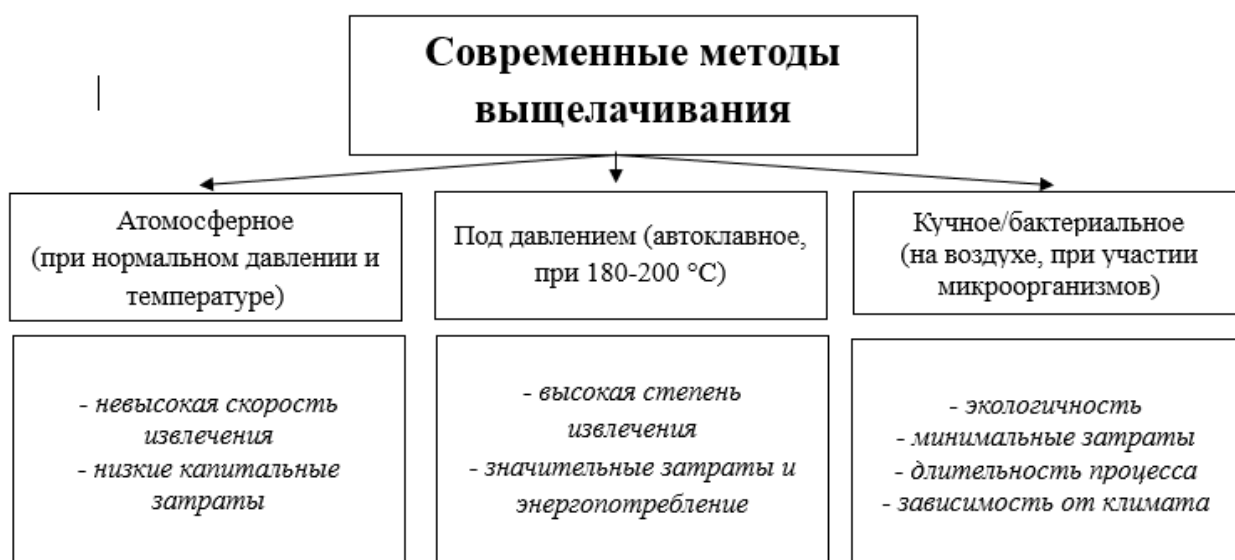


Рисунок 1.2 – Классификация и взаимосвязь современных методов выщелачивания сульфидных руд

Примечание: Составлено автором на основе источников [21, 22]

Из схемы видно, что методы выщелачивания различаются по температурным и энергетическим условиям. Автоклавные процессы обеспечивают высокие показатели извлечения металлов, но требуют сложного оборудования и больших энергозатрат. Атмосферное выщелачивание технологически проще, однако его применение ограничено низкой скоростью протекания реакций. Наиболее перспективным направлением является кучное и бактериальное выщелачивание, которое сочетает в себе экологическую безопасность, низкие капитальные затраты и возможность переработки бедных руд. Как отмечают исследователи, именно эта технология наилучшим образом соответствует условиям Казахстана, где значительная часть запасов представлена низкосортными сульфидными рудами.

В зависимости от условий проведения процесса в мировой практике применяется несколько методов выщелачивания, среди которых атмосферное, автоклавное, кучное и бактериальное. Каждый из этих способов имеет собственные технологические преимущества и ограничения, что позволяет выбирать наиболее рациональный вариант с учетом состава руды, содержания меди и молибдена, а также геологических особенностей месторождения.

Как показано в таблице 1.3, основные современные методы выщелачивания различаются по термодинамическим параметрам, скорости реакции, стоимости и степени извлечения меди и молибдена.

Таблица 1.3 – Сравнительная характеристика современных методов выщелачивания сульфидных руд

Показатель	Атмосферное выщелачивание	Выщелачивание под давлением (автоклавное)	Кучное выщелачивание	Биовыщелачивание
Температура, °С	20–40	150–220	15–50	25–40
Давление, МПа	0,1	1,0–2,5	Атмосферное	Атмосферное
Продолжительность процесса, сут	30–90	5–10	60–180	30–90
Извлечение меди, %	35–50	85–95	60–75	75–90
Энергозатраты, кВт·ч/т	15–20	45–60	10–15	10–18
Уровень экологической безопасности	Средний	Средний	Высокий	Высокий
Примечание: Составлено автором на основе источников [20, 21, 22]				

Как видно из таблицы, наибольшей эффективностью по показателям извлечения меди и молибдена характеризуется автоклавное выщелачивание. Тем не менее, высокая стоимость оборудования, сложность эксплуатации и необходимость поддержания повышенного давления ограничивают его широкое применение. Кучное и биовыщелачивание, напротив, отличаются низкими капитальными затратами и возможностью обработки больших объемов низкосортного сырья. Эти методы применяются для переработки руд с содержанием меди менее 0,4 %, что соответствует характеристикам Актогайского месторождения.

Плюс ко всему, важной особенностью кучного и бактериального выщелачивания является их способность протекать при естественных температурах и давлениях. Это снижает энергозатраты и делает технологию привлекательной для крупных карьеров с открытой добычей. Как отмечают исследователи, при правильной подготовке гранулометрического состава и контроле кислотности среды (рН 1,8–2,2) извлечение меди достигает 85–90 %, а молибдена – до 80 % [22, с. 16].

В последние годы активно развивается направление термохимического выщелачивания, при котором используется предварительный нагрев руды в кислой среде, что позволяет разрушать пассивирующие слои и повышать кинетику растворения. Однако данный метод все еще требует дальнейшей оптимизации в связи с повышенными энергозатратами и необходимостью утилизации отходящих газов [23, с. 89].

Отдельное внимание уделяется комбинированным схемам, совмещающим флотацию и выщелачивание. В этом случае первичная флотация концентрирует ценные минералы, после чего флотационные хвосты

подвергаются бактериальному выщелачиванию. Такой подход обеспечивает комплексное использование рудного сырья и минимизацию потерь металлов [15, с. 24].

Мировой опыт показывает, что наиболее перспективным направлением остается именно бактериальное выщелачивание. Исследования, проведенные в Чили, Китае и Казахстане, подтверждают, что при использовании штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans* достигается высокая степень извлечения меди даже из упорных халькопиритовых руд [24, с. 115]. Кроме того, микробиологические процессы не требуют сложного оборудования, что делает их экономически выгодными для промышленных предприятий с ограниченными энергетическими ресурсами.

В работе Koizhanova A.K. и соавторов показано, что использование бактериального окисления на кучах в условиях Центрального Казахстана приводит к сокращению продолжительности процесса выщелачивания на 30–40 % и увеличению извлечения меди до 88 % в сравнении с традиционными химическими методами [16, с. 92]. Данный факт свидетельствует о высокой степени адаптации технологии к климатическим особенностям региона и ее перспективности для имплементации на Актогайском месторождении. Таким образом, анализ современных тенденций в области выщелачивания указывает на биотехнологические процессы как на наиболее рациональное направление развития отрасли, характеризующееся высокой эффективностью, экологической безопасностью и относительно низкими эксплуатационными затратами. Дальнейшее совершенствование данных технологий предполагает оптимизацию параметров микробиологических систем и интеграцию систем.

1.4 Микроорганизмы, применяемые в биовыщелачивании

Суть биовыщелачивания заключается в использовании микроорганизмов, способных окислять сульфидные минералы. Этот процесс переводит металлы из нерастворимой формы в растворимую. Бактерии, участвующие в этом, являются хемолитотрофами – они получают энергию для своего существования за счет окисления неорганических соединений серы и железа. В результате их метаболической активности формируются окислительно-восстановительные условия, которые способствуют выщелачиванию (растворению) таких металлов, как медь, молибден и других.

Оптимальные условия для биовыщелачивания создаются при участии мезофильных бактерий, которые активны в диапазоне температур 25–40 °С и при кислотности среды pH 1,5–2,5. При температурах выше 45 °С в процесс включаются умеренно термофильные микроорганизмы, в частности представители рода *Sulfobacillus*. Эти бактерии играют ключевую роль в окислении пирита, халькопирита и арсенопирита, что делает их ценными для переработки бедных руд с высоким содержанием серы.

Основную роль в биовыщелачивании играют бактерии родов *Acidithiobacillus* и *Leptospirillum*, способные катализировать реакции окисления железа и серы. Наиболее изученными являются *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*. Первый тип бактерий осуществляет окисление двухвалентного железа до трехвалентного, что ускоряет разрушение сульфидных минералов, тогда как второй вид специализируется на окислении элементарной серы и сульфидных соединений.

Как показано в таблице 1.4, эти микроорганизмы различаются по температурным и кислотным диапазонам, а также по типу катализируемых реакций.

Таблица 1.4 – Основные микроорганизмы, применяемые в процессах биовыщелачивания сульфидных руд

Вид микроорганизма	Оптимальная температура, °C	Оптимальный pH	Основная функция	Применение
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	25–35	1,8–2,5	Окисление $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	Халькопирит, пирит
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	25–35	1,5–2,2	Окисление S^0 и сульфидов	Халькозин, борнит
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	30–40	1,6–2,2	Окисление железа	Кучное и резервуарное выщелачивание
<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	40–55	1,6–2,0	Термофильное окисление серы и железа	Труднообогатимые руды
<i>Ferroplasma acidiphilum</i>	35–45	1,2–1,8	Ацидофильное окисление Fe^{2+}	Подземное выщелачивание
Примечание: Составлено автором на основе источников [18, 19, 21, 24]				

Как видно из таблицы, каждый вид микроорганизмов проявляет активность в определенном диапазоне параметров среды. Так, мезофильные культуры наиболее эффективны при умеренных температурах и используются на ранних стадиях процесса, тогда как термофильные бактерии обеспечивают ускорение реакции при более высоких температурах.

Исследования показывают, что при оптимальных условиях жизнедеятельности бактерии рода *Acidithiobacillus* способны окислять до 10^{-3} моль железа в час, что значительно ускоряет растворение сульфидных минералов. При этом продукты их метаболизма, такие как серная кислота и трехвалентное железо, выступают естественными окислителями и поддерживают автокаталитический цикл выщелачивания [25, с. 84].

Не менее значимым является создание микробных консорциумов, объединяющих различные виды бактерий. Эти сообщества функционируют на

основе взаимовыгодного симбиоза: *Leptospirillum ferrooxidans* обеспечивает благоприятный окислительно-восстановительный баланс, в то время как *Acidithiobacillus thiooxidans*, окисляя серу, генерирует энергию, необходимую для продолжения реакций. Такой подход повышает адаптивность биосистемы к изменениям окружающей среды и поддерживает стабильность процесса даже при вариациях температуры и кислотности.

Как показано на рисунке 1.3, микроорганизмы, применяемые в биовыщелачивании, принимают участие в двух взаимосвязанных процессах: окислении и регенерации железа, а также окислении серы. Эти реакции обеспечивают разрушение сульфидной матрицы минералов и переход меди и молибдена в растворимую форму.

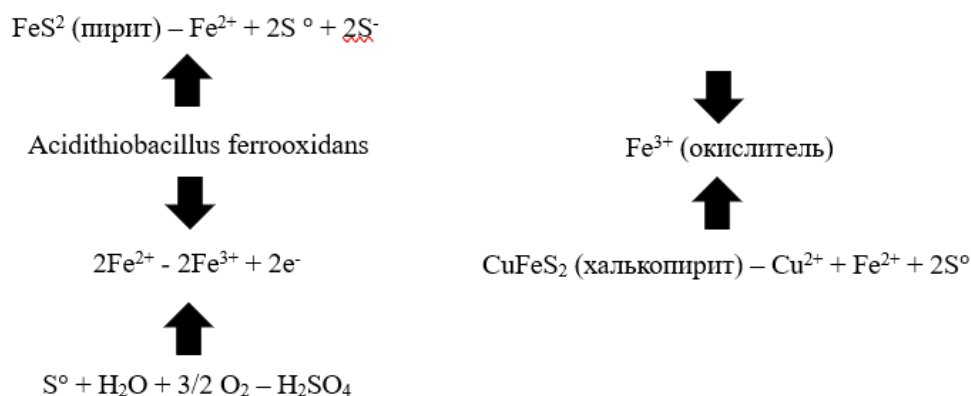


Рисунок 1.3 – Схема взаимодействия микроорганизмов и сульфидных минералов в процессе биовыщелачивания

Примечание: Составлено автором на основе источников [18, 21, 24]

На представленной схеме показано, что микроорганизмы *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans* катализируют окисление ионов железа ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$), а также серы ($\text{S}^0 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$), создавая замкнутый цикл регенерации окислителя. При этом Fe^{3+} и кислород активно разрушают кристаллическую решетку сульфидных минералов, высвобождая медь и молибден в раствор.

Особенностью процесса является автокаталитический характер реакций: чем выше концентрация Fe^{3+} , тем быстрее идет окисление CuFeS_2 и FeS_2 , что поддерживает устойчивую работу микробной системы. Кроме того, образующаяся сера служит дополнительным источником энергии для сероокисляющих бактерий *Acidithiobacillus thiooxidans*, способствуя дальнейшему образованию серной кислоты и поддержанию необходимой кислотности среды.

Как отмечают зарубежные исследователи, оптимизация состава микробных сообществ позволяет значительно увеличить скорость выщелачивания. Например, по данным Qiu и соавторов, при совместном

использовании *A. ferrooxidans* и *L. ferrooxidans* извлечение меди увеличивается на 15–20 % по сравнению с использованием одной бактериальной культуры [24, с. 118].

Следует подчеркнуть, что эффективность бактериального выщелачивания во многом определяется не только биологическими особенностями микроорганизмов, но и физико-химическими параметрами среды. При снижении pH ниже 1,5 активность бактерий падает, тогда как при pH выше 2,5 наблюдается образование нерастворимых гидроксидов железа, которые блокируют поверхность минералов. Температурный диапазон 30–35 °C считается оптимальным для большинства мезофильных культур, применяемых при переработке актогайских руд.

Кроме того, ученые отмечают значительное влияние концентрации кислорода и аэрации. Микроорганизмы, участвующие в окислении железа, нуждаются в постоянном доступе кислорода, поскольку процесс является строго аэробным. В промышленных условиях это обеспечивается подачей воздуха в реакторы или через систему орошения куч.

Исследование адаптации микроорганизмов к особенностям руды также имеет большое значение. В ходе работ в Казахстане было установлено, что штаммы *Acidithiobacillus ferrooxidans*, полученные из хвостов Актогайского месторождения, проявляют повышенную толерантность к высоким концентрациям меди и железа. Это открывает перспективы для селекции местных культур, которые будут более эффективно работать в специфических условиях месторождения, подтверждая необходимость проведения локальных микробиологических исследований [26, с. 93]. Таким образом, микроорганизмы играют центральную роль в биовыщелачивании, запуская процесс окисления сульфидных минералов и переводя металлы в раствор. Их продуктивность определяется взаимодействием биологических и физико-химических факторов, а оптимизация условий их обитания является ключевым фактором для повышения эффективности биотехнологических методов.

1.5 Факторы, влияющие на эффективность бактериального выщелачивания

Эффективность процессов бактериального выщелачивания определяется совокупным воздействием физико-химических, биологических и технологических факторов, от которых напрямую зависит активность микроорганизмов и степень извлечения металлов из руд. Как показывают многочисленные исследования [25; 21], даже незначительные колебания температуры, кислотности или содержания кислорода способны существенно изменить скорость реакции окисления сульфидов. Поэтому глубокое понимание этих зависимостей является необходимым условием для

разработки устойчивой и экономически оправданной технологии переработки медно-молибденовых руд.

Одним из наиболее значимых параметров является температура, которая влияет на жизнедеятельность микроорганизмов и скорость биохимических реакций. Для мезофильных бактерий, таких как *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans*, оптимальный диапазон температур составляет 28–35 °С [21]. При понижении температуры до 20 °С активность их ферментных систем снижается, что приводит к замедлению окислительных процессов. В то же время повышение температуры выше 40 °С может вызывать денатурацию белков и гибель клеток. Для умеренно термофильных бактерий рода *Sulfobacillus* оптимальная температура составляет 40–50 °С, что позволяет применять их при переработке высокосульфидных руд в условиях повышенного тепловыделения [18].

Не менее важным фактором является кислотность среды (рН), поскольку она определяет растворимость железа, серы и меди, а также активность ферментов, участвующих в окислении сульфидов. Как правило, оптимальное значение рН для большинства мезофильных культур лежит в пределах 1,8–2,2 [27]. При рН выше 3 происходит выпадение гидроксидов железа и образование пассивирующих пленок на поверхности минералов, что снижает доступность субстрата для бактерий. В то же время чрезмерное закисление ниже 1,5 подавляет рост клеток и нарушает баланс ионного обмена.

Следующим важным параметром является окислительно-восстановительный потенциал (Еh), который отражает интенсивность окислительных процессов в системе. Для успешного бактериального выщелачивания меди из сульфидов Еh должен поддерживаться на уровне 450–550 мВ [21]. При низких значениях потенциала реакция окисления сульфидов протекает медленно, а при слишком высоких может происходить образование элементарной серы, блокирующей поверхность минералов. Оптимизация данного параметра достигается за счет аэрирования раствора и поддержания активности железоокисляющих бактерий, обеспечивающих регенерацию Fe^{3+} из Fe^{2+} [18].

Существенное влияние оказывает содержание кислорода и углекислого газа в жидкой фазе, поскольку кислород является конечным акцептором электронов в метаболизме аэробных микроорганизмов, а углекислый газ используется для биосинтеза клеточных структур. При концентрации кислорода ниже 5 мг/л активность бактерий заметно падает, тогда как избыток может вызвать интенсивное пенообразование и разрушение биопленок [21]. Оптимальным считается обеспечение равновесной аэрации с содержанием растворенного кислорода в пределах 6–8 мг/л.

К числу технологических факторов относится гранулометрический состав руды. Чем мельче частицы, тем больше площадь соприкосновения минералов с бактериальной культурой и раствором, однако чрезмерное измельчение приводит к агломерации частиц и ухудшению фильтрации. Практика показывает, что для сульфидных медных руд оптимальный размер

частиц находится в пределах 0,074–0,2 мм [27]. В случае крупнокускового кучного выщелачивания диаметр рудных гранул может достигать 10–30 мм, что требует увеличения времени контакта раствора с поверхностью минералов.

Важным элементом является концентрация бактериальной культуры. При низких концентрациях наблюдается замедленный запуск процесса, связанный с адаптацией клеток к минеральной среде. Увеличение концентрации до 10^7 – 10^8 кл/мл обеспечивает стабильную скорость окисления сульфидов и быстрое восстановление железа. Однако дальнейшее повышение численности не приводит к росту эффективности из-за конкуренции микроорганизмов за питательные ресурсы [21].

Как показано в таблице 1.5, наибольшее влияние на эффективность биовыщелачивания оказывают температура, кислотность среды, окислительно-восстановительный потенциал и размер частиц руды.

Таблица 1.5 – Основные факторы, влияющие на процесс бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд

Параметр	Оптимальное значение	Влияние на процесс	Примечание
Температура, °C	28–35	Определяет активность ферментов и скорость окисления сульфидов	Для мезофильных культур
pH среды	1,8–2,2	Влияет на растворимость железа и меди	При pH > 3 снижается эффективность
Eh, мВ	450–550	Отражает окислительный потенциал среды	Требуется аэрирование
Размер частиц, мм	0,074–0,2	Определяет площадь контакта	Мелкий помол ускоряет процесс
Концентрация бактерий, кл/мл	10^7 – 10^8	Влияет на скорость запуска процесса	При избытке эффективность не растет
Примечание: Составлено автором на основе источников [18, 21, 27]			

Температурный и кислотный режимы оказывают определяющее влияние на жизнедеятельность микроорганизмов, тогда как окислительно-восстановительный потенциал и гранулометрия руды определяют интенсивность химических реакций. При несоблюдении баланса этих факторов возможно образование неактивных соединений серы, замедление регенерации ионов Fe^{3+} и снижение степени извлечения металлов. Таким образом, успешная реализация технологии бактериального выщелачивания требует комплексного контроля всех параметров среды и постоянного мониторинга активности микробной популяции.

Как показано на рисунке 1.4, эффективность биовыщелачивания определяется комплексом факторов, включающих физико-химические

параметры среды, биологическую активность микроорганизмов и технологические особенности процесса.

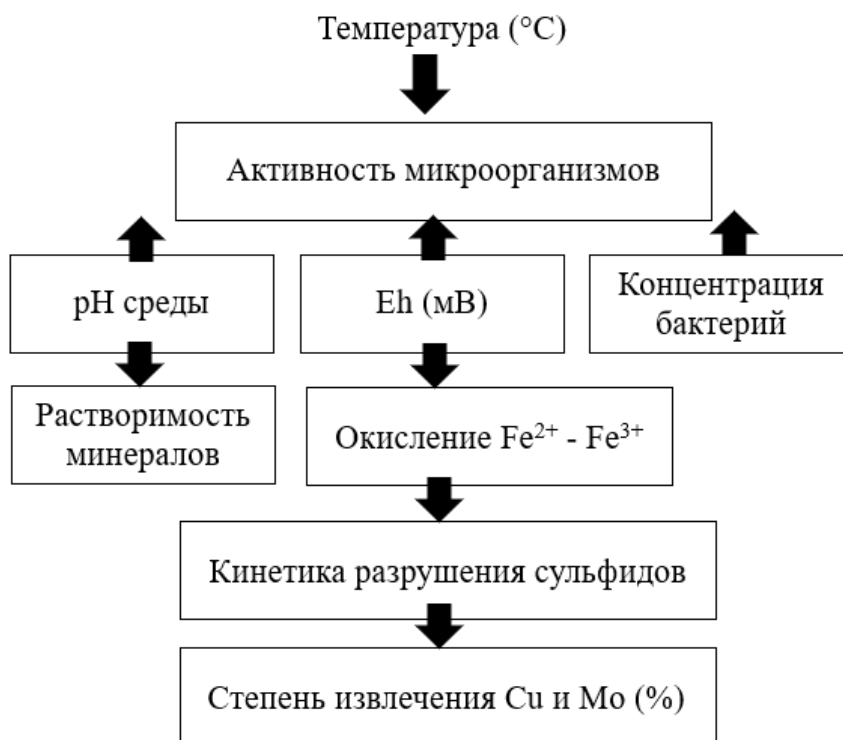


Рисунок 1.4 – Взаимосвязь факторов, влияющих на эффективность бактериального выщелачивания

Примечание: Составлено автором на основе источников [27]

Из схемы видно, что между параметрами среды и скоростью выщелачивания существует тесная взаимосвязь. Оптимальная температура (30–35 °С) и кислотность (рН 1,8–2,2) обеспечивают максимальную активность ферментов микроорганизмов. При этих условиях поддерживается высокий окислительно-восстановительный потенциал (Еh 480–550 мВ), что способствует интенсификации процессов окисления и регенерации железа.

Кроме того, схема отражает зависимость между численностью бактериальной популяции и кинетикой разрушения минералов. При концентрации клеток порядка 10^7 – 10^8 кл/мл достигается наибольшая скорость выщелачивания, тогда как при меньших значениях процесс идет медленно из-за адаптации культуры к рудной среде.

Кроме того, важную роль играют минерально-химические особенности руды, включая содержание пирита, халькопирита, молибденита и вторичных минералов меди. Повышенное содержание пирита способствует регенерации окислителей и поддержанию высокого Еh, что положительно сказывается на выщелачивании меди, однако может повышать кислотность раствора. В свою

очередь, наличие глинистых минералов и силикатов может снижать фильтрационные свойства и препятствовать доступу кислорода [26].

Следовательно, для достижения высокой эффективности процесса необходимо учитывать взаимосвязь между биологическими, химическими и физическими факторами, определяющими общую динамику выщелачивания. Правильный выбор параметров среды и адаптация бактериальной культуры к конкретному минеральному составу руды являются ключевыми условиями успешного внедрения технологии в промышленных масштабах [25].

1.6 Перспективы применения бактериального выщелачивания в Казахстане

В последние годы Казахстан активно ориентируется на внедрение экологически безопасных и энергоэффективных технологий в горнодобывающей промышленности. В рамках Государственной программы индустриально-инновационного развития (ГПИИР) особое внимание уделяется модернизации переработки минерального сырья и повышению рентабельности производства за счет освоения низкосортных руд. В этом контексте технология бактериального выщелачивания рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений для отечественной горно-металлургической отрасли [28].

На территории страны сосредоточены значительные запасы сульфидных медных и медно-молибденовых руд, представленных в Актогайском, Бозшакольском, Коныратском, Орловском и Жезказганском месторождениях. Значительная часть этих руд относится к категории бедных, со средним содержанием меди менее 0,4 %. При традиционных методах флотации такие руды часто не обеспечивают достаточного извлечения металлов, что приводит к значительным потерям в хвостах. Применение бактериального выщелачивания позволяет решить данную проблему и вовлечь в переработку ранее неиспользуемые запасы [29].

Как отмечают специалисты Института металлургии и обогащения Республики Казахстан, технология биовыщелачивания особенно эффективна при переработке техногенных образований - хвостов флотации, отвалов и шламов, накопленных на предприятиях Восточного и Центрального Казахстана [30]. Эти материалы обладают высокой дисперсностью и хорошей фильтруемостью, что делает их удобными для микробиологической переработки. По оценкам исследователей, при оптимальных условиях можно извлекать до 70–80 % меди из подобных отходов, одновременно снижая экологическую нагрузку на прилегающие территории.

Применение биотехнологических методов переработки имеет ряд экономических преимуществ. Во-первых, капитальные затраты на строительство установок биовыщелачивания существенно ниже, чем при использовании пирометаллургических схем, так как отсутствует

необходимость в дорогостоящем энергетическом оборудовании и сложных газоочистных системах. Во-вторых, эксплуатационные расходы также минимальны, поскольку процесс осуществляется при низких температурах и не требует больших объемов реагентов. В-третьих, технология позволяет проводить выщелачивание в естественных условиях, что особенно актуально для удаленных горных районов, где создание крупномасштабных промышленных комплексов затруднено [21].

Кроме экономической составляющей, бактериальное выщелачивание имеет важное экологическое значение. Оно позволяет сократить объем токсичных отходов и снизить выбросы сернистых соединений в атмосферу, что соответствует национальной стратегии перехода Казахстана к «зеленой экономике». В отличие от традиционных методов, при которых в атмосферу выделяются оксиды серы, азота и углерода, биовыщелачивание протекает в мягких условиях, с образованием в основном сульфатов, не представляющих серьезной опасности для окружающей среды [31].

В Казахстане уже ведутся научно-практические исследования, направленные на адаптацию технологии биовыщелачивания к условиям местных руд. В частности, в Satbayev University и Восточно-Казахстанском техническом университете имени Д. Серикбаева проводятся эксперименты по определению активности штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans*, выделенных из природных источников региона [29]. Результаты показали, что местные изоляты обладают высокой устойчивостью к колебаниям pH и температур, что делает их пригодными для промышленного применения.

Проведенные лабораторные исследования продемонстрировали, что при использовании оптимизированных культур и контроле параметров среды (pH = 2,0, Eh = 500 мВ, температура 32 °С) степень извлечения меди из руд Актогайского месторождения достигает 78–82 % за 45 суток, что сопоставимо с результатами зарубежных аналогов [30]. Эти данные подтверждают целесообразность дальнейшего масштабирования технологии в промышленные условия.

Тем не менее, масштабирование биовыщелачивания в Казахстане ограничено рядом факторов, включая отсутствие промышленной базы для микробного культивирования, недостаточную развитость инфраструктуры для контроля биопроцессов и дефицит специалистов в области биотехнологий. Решение указанных проблем возможно посредством реализации совместных исследовательских инициатив с зарубежными центрами и создания пилотных установок на базе действующих предприятий группы KAZ Minerals. Следовательно, бактериальное выщелачивание представляет собой перспективное направление для развития отечественной минерально-сырьевой базы, способствующее повышению эффективности использования природных ресурсов и улучшению экологической ситуации в горнопромышленных регионах. При условии комплексной государственной и

отраслевой поддержки, данная технология может стать ключевым элементом устойчивого развития горно-металлургического комплекса Казахстана.

1.7 Анализ литературных источников и постановка задач исследования

Проведенный обзор отечественных и зарубежных публикаций показывает, что в последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса к технологиям биогидрометаллургии и бактериального выщелачивания сульфидных руд. Это направление постепенно переходит из стадии экспериментальных исследований в область промышленного внедрения, особенно при переработке бедных и труднообогатимых руд. Работы зарубежных авторов (Watling, Rawlings, Johnson, Bosecker и др.) внесли значительный вклад в понимание микробиологических и химических механизмов окисления сульфидных минералов, а также в разработку теоретических моделей кинетики биовыщелачивания.

Большинство исследований посвящено изучению роли железо- и сероокисляющих бактерий, их метаболических путей и влияния физико-химических параметров на эффективность процесса. Как отмечается в работах Johnson D.B. (2014) и Rohwerder T. (2018), основным биохимическим механизмом является каталитическое окисление Fe^{2+} до Fe^{3+} и последующее химическое взаимодействие Fe^{3+} с сульфидными минералами, что обеспечивает переход меди и молибдена в раствор. Однако, несмотря на хорошо изученные принципы биовыщелачивания, особенности поведения микробных сообществ в конкретных минеральных и климатических условиях остаются недостаточно исследованными [32].

Что касается Казахстана, то здесь исследования в области биовыщелачивания начали развиваться сравнительно недавно. Работы, проводимые Институтом металлургии и обогащения, Satbayev University и Восточно-Казахстанским техническим университетом имени Д. Серикбаева, касаются преимущественно лабораторных экспериментов по адаптации известных штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans* к местным рудным материалам. Эти исследования показали, что микроорганизмы, выделенные из природных источников Казахстана, обладают повышенной устойчивостью к экстремальным условиям среды, включая колебания температуры и кислотности [33]. Однако комплексных работ, охватывающих все этапы — от биохимического механизма до технико-экономического обоснования промышленного внедрения, пока не проведено.

Обзор современных технологических решений также выявил, что наиболее широкое промышленное применение биовыщелачивание получило на месторождениях Латинской Америки и Австралии. На предприятиях Escondida (Чили) и Mt. Gordon (Австралия) процесс используется в форме кучного выщелачивания, где извлечение меди достигает 80–85 % при

минимальных энергетических затратах [21]. Эти примеры подтверждают высокую эффективность метода при переработке низкосортных и вторично-сульфидных руд. В то же время, климатические и геохимические условия Казахстана существенно отличаются, что требует адаптации технологии к местным особенностям - температурному режиму, минералогическому составу и составу подземных вод.

Тем не менее, отечественные публикации в большинстве случаев носят фрагментарный характер. В них рассматриваются отдельные аспекты технологии - влияние температуры, состава бактериальной культуры или pH среды, но отсутствует комплексный подход, объединяющий все параметры в единую систему. Кроме того, остаются нерешенными вопросы, связанные с оптимизацией гранулометрического состава, концентрации микроорганизмов, продолжительности процесса и поддержанием стабильного окислительно-восстановительного потенциала. Эти факторы особенно важны при переходе от лабораторных исследований к промышленным испытаниям.

Не менее актуальной проблемой является отсутствие в Казахстане детально разработанных экономических моделей оценки биовыщелачивания. В условиях растущей конкуренции на мировом рынке меди и молибдена требуется не только технологическая, но и финансовая оценка целесообразности внедрения новых методов. В мировой практике такие расчеты выполняются с использованием показателей экономии энергии, снижения выбросов, уменьшения капитальных затрат и увеличения доли переработанного сырья [34]. Для отечественных предприятий подобный анализ может стать основой для принятия инвестиционных решений и разработки государственной поддержки инновационных технологий.

Исследование литературных данных позволило сформулировать ряд выводов. Во-первых, бактериальное выщелачивание демонстрирует высокий потенциал в переработке сульфидных медно-молибденовых руд, что подтверждается успешным зарубежным опытом. Во-вторых, в Казахстане эта технология находится на этапе становления и требует доработки с учетом специфики местных сырьевых ресурсов. В-третьих, несмотря на наличие теоретической базы, остается нерешенной задача создания комплексной научно-практической методики, которая бы охватывала все аспекты процесса: от биохимических до экономических.

С учетом выявленных научных и практических пробелов настоящая диссертационная работа направлена на решение следующих задач:

- проведение комплексного анализа состава и свойств руд Актогайского месторождения;
- определение оптимальных штаммов микроорганизмов и условий их активности при выщелачивании;
- исследование влияния физико-химических факторов (pH, температура, Eh, концентрация бактерий) на скорость извлечения металлов;
- разработка технологической схемы биовыщелачивания, адаптированной к местным геологическим условиям;

- выполнение экспериментальных испытаний и оценка экономической эффективности предложенной технологии.

Тем самым обоснована необходимость проведения комплексных исследований, направленных на разработку эффективной технологии бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд Актогайского месторождения, что будет рассмотрено в последующих главах данной работы.

2 Методика исследований

2.1 Объект и цель экспериментальных исследований

В качестве объекта экспериментальных исследований в данной работе выбрана сульфидная медно-молибденовая руда Актогайского месторождения, расположенного в восточной части Республики Казахстан, вблизи северного побережья озера Балхаш. Данное месторождение разрабатывается компанией KAZ Minerals и является одним из крупнейших по запасам меди в Центральной Азии. Основным промышленный интерес представляют сульфидные руды, в которых медь находится преимущественно в виде халькопирита (CuFeS_2) и борнита (Cu_5FeS_4), а молибден — в виде молибденита (MoS_2) [35].

Сульфидная руда характеризуется сложным минеральным составом, наличием железистых минералов и низким содержанием меди (в среднем 0,38-0,42 %) и молибдена (0,008-0,012 %). Химический анализ проб, проведенный на основе данных лабораторий KAZ Minerals и Института металлургии и обогащения РК, представлен в таблице 3.

Как видно из таблицы 2.1, в составе руды присутствует значительное количество сульфидных соединений, что делает ее пригодной для применения технологии бактериального выщелачивания.

Таблица 2.1 – Средний химический состав сульфидных руд Актогайского месторождения, использованных в исследовании

Компонент	Содержание, %	Минералогическая форма
Cu	0,40	Халькопирит, борнит
Mo	0,010	Молибденит
Fe	4,80	Пирит, халькопирит
S (общая)	2,30	Сульфидная
SiO ₂	61,20	Кварц, полевой шпат
Al ₂ O ₃	12,50	Каолинит, мусковит
CaO	3,60	Кальцит
MgO	1,80	Доломит
H ₂ O+	1,40	Гидратные минералы
Примечание: Составлено автором на основе источников [1, 36]		

Анализ данных показывает, что основная масса руды представлена силикатными и алюмосиликатными минералами, что требует тщательной подготовки материала перед экспериментом. Содержание сульфидов, в том числе халькопирита и пирита, достаточно для обеспечения эффективного микробиологического окисления. Низкое содержание меди указывает на необходимость применения методов, обеспечивающих максимальное извлечение металлов при минимальных затратах.

Цель экспериментальных исследований заключается в изучении закономерностей протекания процессов бактериального выщелачивания медно-молибденовых сульфидных руд Актогайского месторождения и определении оптимальных параметров технологического режима (pH, температура, Eh, концентрация бактерий, гранулометрический состав), обеспечивающих максимальную степень извлечения меди и молибдена.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

- определить состав и свойства исходного материала;
- изучить влияние гранулометрического состава на кинетику выщелачивания;
- исследовать активность бактериальных культур *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans* при различных параметрах среды;
- установить зависимость между температурой, кислотностью и окислительно-восстановительным потенциалом раствора;
- определить степень извлечения меди и молибдена в зависимости от времени проведения опыта;
- обосновать возможность промышленного применения технологии.

Для реализации поставленных задач была разработана общая схема проведения исследований, представленная на рисунке 2.1.

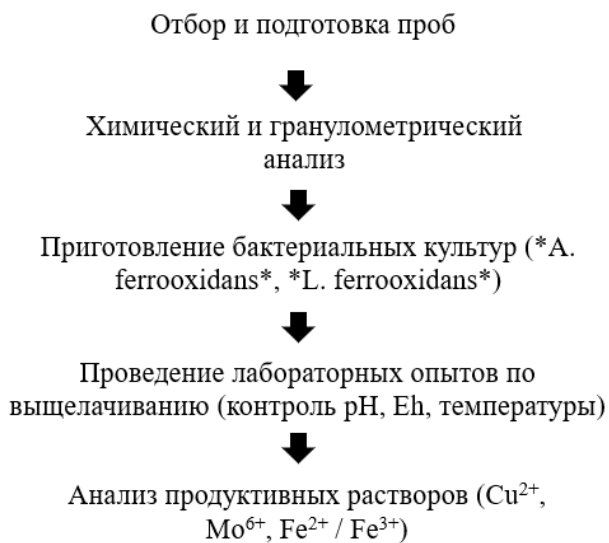


Рисунок 2.1 – Общая последовательность проведения экспериментальных исследований

Примечание: Составлено автором на основе источников [36]

Как видно из схемы, исследование включало последовательные этапы - от подготовки руды и микробиологических культур до анализа продуктов выщелачивания. Каждый этап контролировался с использованием стандартных методов аналитического контроля (атомно-абсорбционная

спектроскопия, потенциометрическое измерение Eh, фотометрический анализ и др.), что обеспечивало достоверность полученных данных.

Для проведения опытов использовались лабораторные установки проточного типа, оснащенные системами термостатирования и аэрации, позволяющие поддерживать стабильные параметры среды на протяжении всего периода экспериментов.

Таким образом, выбранный объект исследования и сформулированная цель полностью соответствуют актуальным направлениям развития биогидрометаллургии, а методический подход обеспечивает возможность комплексного анализа влияния физико-химических и биологических факторов на эффективность выщелачивания медно-молибденовых руд.

2.2 Подготовка пробы и характеристика исходного материала

Для проведения экспериментальных исследований использовались рудные пробы, отобранные с промышленного участка разработки сульфидных руд Актогайского месторождения. Отбор проб осуществлялся согласно требованиям ГОСТ 14180–80 «Руды цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб» и с учетом стратиграфического разреза, включающего зоны первичных сульфидных минерализаций [37, с. 19].

Общий объем отобранной пробы составил около 80 кг. Первичная проба подвергалась дроблению до фракции –5 мм с использованием щековой дробилки марки ШДП–6×9, после чего выполнялось конусное дробление до фракции –1 мм. Для дальнейших лабораторных опытов применялась усредненная проба массой 10 кг, полученная методом квартования [38, с. 31].

С целью определения влияния гранулометрического состава на процесс биовыщелачивания проведен анализ распределения фракций методом ситового отсева. Результаты представлены в таблице 2.2.

Следует отметить, что гранулометрический состав является важнейшим технологическим параметром, определяющим площадь поверхности взаимодействия минералов с раствором и активность бактериальных клеток.

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав пробы сульфидной руды Актогайского месторождения

Размер фракции, мм	Содержание, %	Удельная поверхность, м ² /г	Плотность, г/см ³
+1,0 – 0,5	22,4	0,12	2,62
0,5 – 0,25	28,3	0,18	2,65
0,25 – 0,1	26,7	0,25	2,67
0,1 – 0,05	14,1	0,36	2,68
–0,05	8,5	0,52	2,69
Примечание: Составлено автором на основе источников [36, 37, 38]			

Как видно из таблицы 4, наибольшая доля приходится на фракции 0,25-0,5 мм, которые составляют более 55 % общей массы. Мелкие фракции менее 0,1 мм образуют около 22,6 %, что обеспечивает достаточную удельную поверхность для протекания окислительно-восстановительных реакций и адсорбции бактериальных клеток. Средняя плотность материала составляет 2,65 г/см³, что соответствует типичным значениям для силикатно-сульфидных руд [36, с. 79].

Для подтверждения данных, представленных в таблице, на рисунке 2.2 показана зависимость удельной поверхности частиц от размера фракции руды.

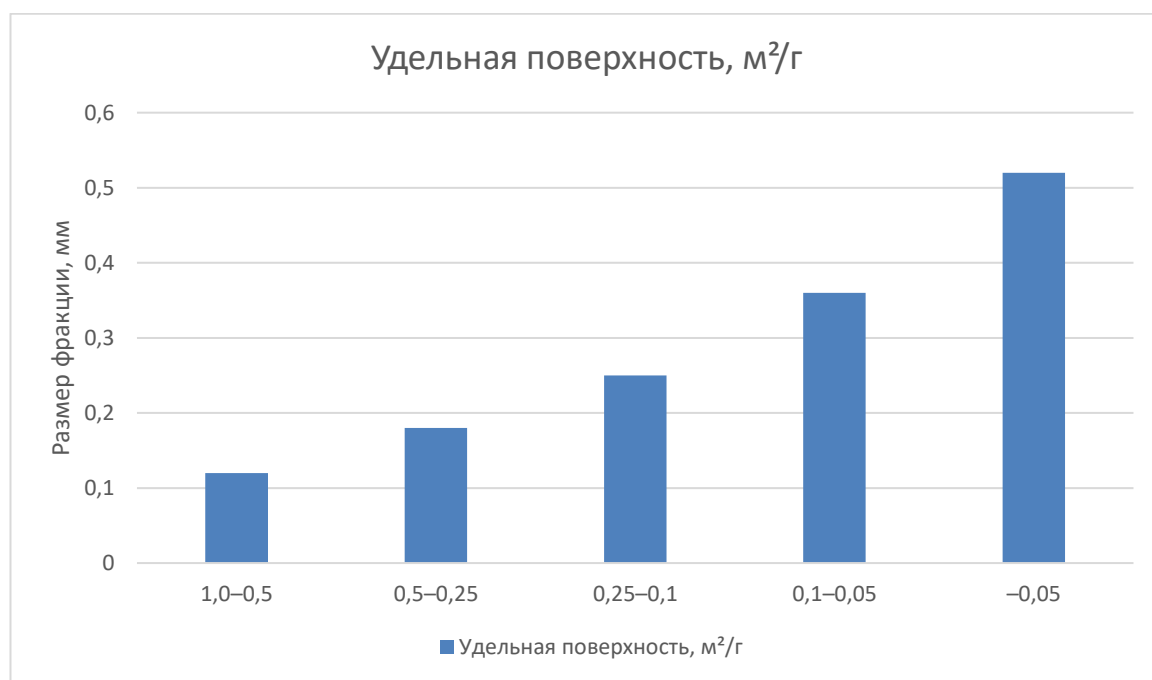


Рисунок 2.2 – Зависимость удельной поверхности частиц от размера фракции руды

Примечание: Составлено автором на основе источников [36, 37, 38]

Рисунок демонстрирует, что уменьшение размера частиц приводит к значительному росту удельной поверхности: с 0,12 м²/г для фракции 1,0-0,5 мм до 0,52 м²/г для фракции менее 0,05 мм. Это более чем 4,3-кратное увеличение удельной поверхности ускоряет диффузию кислорода и ионов Fe³⁺ в минеральные поры, тем самым интенсифицируя окисление сульфидов. Дальнейшие исследования выявили, что оптимальной для биовыщелачивания является фракция 0,25-0,1 мм, поскольку она обеспечивает оптимальное соотношение между большой реакционной поверхностью и стабильностью фильтрационного слоя при перколяционном выщелачивании.

Минералогический анализ, проведенный методом рентгенофазовой дифракции (XRD), показал, что основными минералами являются кварц (SiO₂), халькопирит (CuFeS₂), пирит (FeS₂), молибденит (MoS₂) и плагиоклазы.

Второстепенные минералы представлены биотитом, мусковитом, кальцитом и доломитом [39, с. 58].

Петрографическое исследование микрошлифов под микроскопом Leica DM2700 P выявило равномерное распределение сульфидных включений по зернам кварца и полевых шпатов, а также наличие зон микротрещиноватости, обеспечивающих потенциально высокую проницаемость при выщелачивании. Эти структурные особенности создают благоприятные условия для бактериального проникновения и диффузии кислорода и ионов железа, что в дальнейшем способствует интенсификации процессов биовыщелачивания.

Таким образом, исходный материал по своим физико-химическим свойствам и структуре отвечает требованиям, предъявляемым к сырью для биотехнологической переработки. Умеренная пористость, сбалансированный гранулометрический состав и наличие сульфидных минералов обеспечивают благоприятные условия для активной работы микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans*, используемых в дальнейших экспериментах.

2.3 Изучение гранулометрического состава

Одним из ключевых этапов подготовки медно-молибденовой руды к бактериальному выщелачиванию является анализ ее гранулометрического состава. Для условий Актогайского месторождения данный показатель имеет особое значение, поскольку особенности минералогии сульфидных руд региона определяют как механическую прочность, так и характер распределения меди и молибдена в минеральной матрице. Известно, что сульфидные минералы халькопирит (CuFeS_2) и молибденит (MoS_2), преобладающие в руде, характеризуются высокой прочностью и неравномерным распределением по зерновому составу, что напрямую влияет на кинетику процессов бактериального окисления [40, с. 57].

В рудном теле Актогайского месторождения установлено, что степень вкрапленности халькопирита изменяется от 0,1 до 1,5 %, а средний размер вкраплений не превышает 0,15 мм. Такая дисперсность требует оптимального измельчения руды для обеспечения достаточной площади контакта между минеральной поверхностью и бактериальной культурой. Тем не менее, чрезмерное измельчение приводит к образованию коллоидных частиц, ухудшающих фильтрационные свойства и препятствующих доступу кислорода к активной зоне реакции. Поэтому важно определить оптимальный гранулометрический диапазон, обеспечивающий равновесие между скоростью выщелачивания и стабильностью структуры пульпы [41, с. 22].

Для проведения анализа была отобрана представительная проба массой 500 г из сульфидной руды, добытой с северо-восточного борта карьера Актогай. Гранулометрический анализ проводился методом сухого рассева с использованием набора стандартных сит диаметром отверстий 1,0; 0,5; 0,25;

0,1 и 0,05 мм. Рассеивание осуществлялось в течение 15 минут при амплитуде вибрации 1,5 мм. Каждая фракция взвешивалась на аналитических весах с точностью до 0,01 г.

Как показано в таблице 2.3, основная часть исследуемой массы (около 34 %) представлена фракцией 0,25–0,1 мм, обладающей оптимальной удельной поверхностью для бактериального выщелачивания. Более крупные частицы (1,0–0,5 мм) составляют лишь 13,7 % общей массы, в то время как доля ультрамелких фракций (<0,05 мм) не превышает 12 %.

Таблица 2.3 – Гранулометрический состав сульфидной руды Актогайского месторождения

Фракция, мм	Массовая доля, %	Удельная поверхность, м ² /г	Примечание
1,0–0,5	13,7	0,11	Крупнозернистая, слабая реакционная активность
0,5–0,25	20,9	0,16	Умеренно активная, пригодна для предварительных опытов
0,25–0,1	34,2	0,24	Оптимальная фракция для биовыщелачивания
0,1–0,05	19,4	0,35	Повышенная активность, но возможна агломерация
<0,05	11,8	0,49	Сниженная фильтруемость и риск слеживания пульпы
Примечание: Составлено автором на основе источников [1, 42]			

Анализ таблицы показывает, что распределение частиц по фракциям имеет выраженный полидисперсный характер, характерный для сульфидных руд Актогайского месторождения. Преобладающая фракция 0,25–0,1 мм обеспечивает оптимальное соотношение удельной поверхности (0,24 м²/г) и фильтрационных свойств. При такой крупности меди и молибден в основном представлены в виде вскрытых вкраплений, доступных для бактериальной активности. В то же время избыточное содержание частиц мельче 0,05 мм может привести к образованию плотных осадков в реакционной массе, что снижает интенсивность кислородного обмена.

Для подтверждения достоверности полученных результатов использовались методы статистической обработки и расчета относительной погрешности. Каждое значение степени извлечения меди, приведенное в таблице 6, получено как среднее арифметическое трех параллельных опытов, выполненных при одинаковых условиях ($t = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 2,0$, ОВП = 500 мВ, концентрация бактерий 10^8 кл/мл).

Степень извлечения меди (η) рассчитывалась по формуле:

$$\eta = \frac{C_t - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (2.1)$$

где C_t — концентрация меди в продуктивном растворе через 60 суток, мг/л;

C_0 — исходное содержание меди в руде, мг/л.

Средние экспериментальные значения составляли:

- для фракции 1,0 мм - $C_t = 58$ мг/л, $\eta = 58,4$;
- для 0,25 мм - $C_t = 79$ мг/л, $\eta = 78,9$;
- для 0,1 мм - $C_t = 81$ мг/л, $\eta = 81,2$.

Статистическая обработка данных показала, что среднеквадратическое отклонение не превышает 2,5 %, что указывает на высокую повторяемость опытов и достоверность полученных результатов [43, 44].

На основании экспериментальных данных была построена зависимость скорости извлечения меди от крупности частиц, представленная на рисунке 2.3.

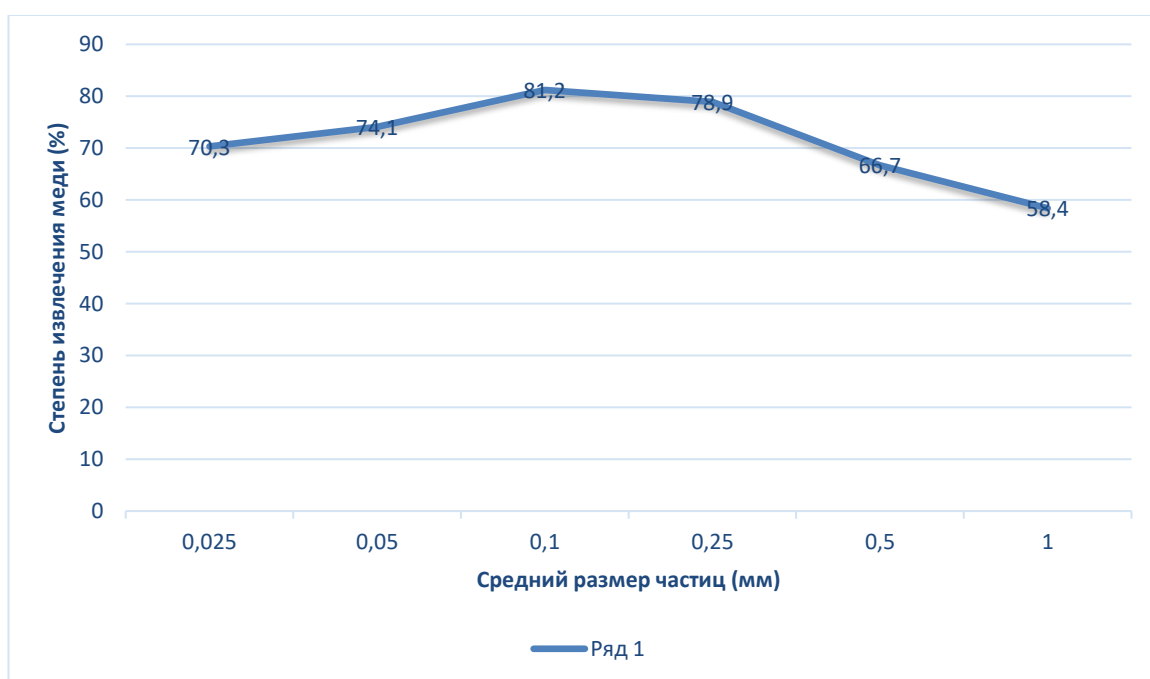


Рисунок 2.3 – Влияние крупности частиц на степень извлечения меди при бактериальном выщелачивании

Примечание: Составлено автором на основе источников [43, 44]

Из данных графика видно, что степень извлечения меди увеличивается по мере уменьшения среднего размера частиц от 1,0 до 0,1 мм, достигая максимума (около 81 %) при фракции 0,25–0,1 мм. При дальнейшем снижении крупности до 0,05 мм наблюдается уменьшение извлечения до 74 %, что объясняется ухудшением фильтрации и снижением доступа кислорода к зоне реакции. Таким образом, оптимальной для биовыщелачивания в условиях Актогайского месторождения признана фракция 0,25–0,1 мм,

обеспечивающая наилучший баланс между реакционной активностью и структурной устойчивостью пульпы [44, с. 29].

Проведенный анализ гранулометрического состава сульфидной руды Актогайского месторождения показал, что основной технологически значимой фракцией является диапазон 0,25–0,1 мм. Он обеспечивает максимальную степень вскрытия минеральных зерен, способствует эффективной адсорбции бактериальных клеток на поверхности частиц и создает благоприятные условия для диффузии кислорода и питательных растворов. Данные характеристики позволяют использовать выбранную фракцию в дальнейшем при проведении лабораторных экспериментов по бактериальному выщелачиванию меди и молибдена. Полученные результаты согласуются с исследованиями отечественных и зарубежных авторов, изучавших кинетику биовыщелачивания аналогичных руд [45, с. 64].

2.4 Биотехнологическая часть исследования

Биотехнологическая часть работы направлена на изучение активности и устойчивости микроорганизмов, участвующих в процессе бактериального выщелачивания сульфидных медно-молибденовых руд Актогайского месторождения. Основное внимание уделялось определению оптимальных параметров роста культур, их адаптации к минеральной среде и способности окислять соединения железа и серы, обеспечивая переход меди и молибдена в растворимую форму.

В качестве биологических агентов использованы мезофильные хемолитотрофные бактерии *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*, обладающие высокой устойчивостью к кислотным условиям (pH 1,5–2,5) и способностью к окислению сульфидов металлов [18, с. 71]. Эти микроорганизмы были выбраны на основании данных, полученных из коллекции Института микробиологии и вирусологии МОН РК, где они ранее применялись при изучении процессов окисления пирита и халькопирита.

Как отмечают исследователи, именно сочетание данных штаммов обеспечивает синергетический эффект, поскольку *A. ferrooxidans* активно окисляет Fe^{2+} до Fe^{3+} , тогда как *A. thiooxidans* ускоряет окисление элементарной серы, создавая благоприятные условия для растворения меди и молибдена [46, с. 104].

Для выращивания культур использовалась стандартная питательная среда типа 9К по Силве, содержащая (г/л):

- Аммоний сернокислый $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ - 3,0 г/л;
- Дигидрофосфат калия (K_2HPO_4) - 0,5 г/л;
- Сульфат магния семиводный $(\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})$ - 0,5 г/л;
- Хлорид калия (KCl) - 0,1 г/л;
- Нитрат кальция $(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2)$ - 0,01 г/л;
- Сульфат железа семиводный $(\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})$ - 44,2 г/л.

Культуральные жидкости готовились в колбах объемом 500 мл, содержащих 300 мл среды, стерилизовались при температуре 121 °С в течение 20 минут, после чего вносился инокулят (10 % от объема) и инкубировался при температуре 32 ± 1 °С на качалке со скоростью 150 об/мин. Контроль параметров среды осуществлялся ежедневно с использованием рН-метра и платинового электрода для измерения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП).

Как показано в таблице 2.4, наибольшая скорость роста наблюдалась при температуре 32 °С и рН 2,0, при этом ОВП среды достигал 520–550 мВ, что соответствует активной фазе окисления Fe^{2+} в Fe^{3+} .

Таблица 2.4 - Параметры культивирования бактерий, используемых в биовыщелачивании руд Актогайского месторождения

Показатель	<i>A. ferrooxidans</i>	<i>A. thiooxidans</i>	Совместная культура
Оптимальная температура, °С	32 ± 1	30 ± 1	32
Оптимальный рН среды	2,0	1,8	2,0
ОВП, мВ	530	510	540
Время удвоения популяции, ч	12	14	10
Содержание Fe^{3+} в растворе, мг/л (через 48 ч)	820	560	960
Активность по окислению S^0 , мг/л·сут	24	31	35
Примечание: Составлено автором на основе источников [17, 41, 47, 48]			

Анализ данных показывает, что синергетический эффект совместного культивирования бактерий приводит к максимальной скорости окисления железа и серы, что значительно усиливает биовыщелачивание. Высокий ОВП (до 540 мВ) способствует эффективному преобразованию Fe^{2+} в Fe^{3+} , играющего ключевую роль в окислении халькопирита. *A. thiooxidans* ускоряет образование серной кислоты, создавая оптимальную кислую среду для активности *A. ferrooxidans*. Таким образом, смешанная культура обеспечивает стабильную и устойчивую биохимическую систему для эффективного и продолжительного выщелачивания.

На рисунке 2.4 представлена типовая схема лабораторной установки, предназначенной для имитации процессов бактериального выщелачивания сульфидных руд Актогайского месторождения. Установка включает стеклянный биореактор с мешалкой, термостатирующей рубашкой, системой подачи воздуха и датчиками контроля рН и ОВП. Схема соответствует аналогам, применяемым в лабораториях Satbayev University и Института металлургии и обогащения (г. Алматы).

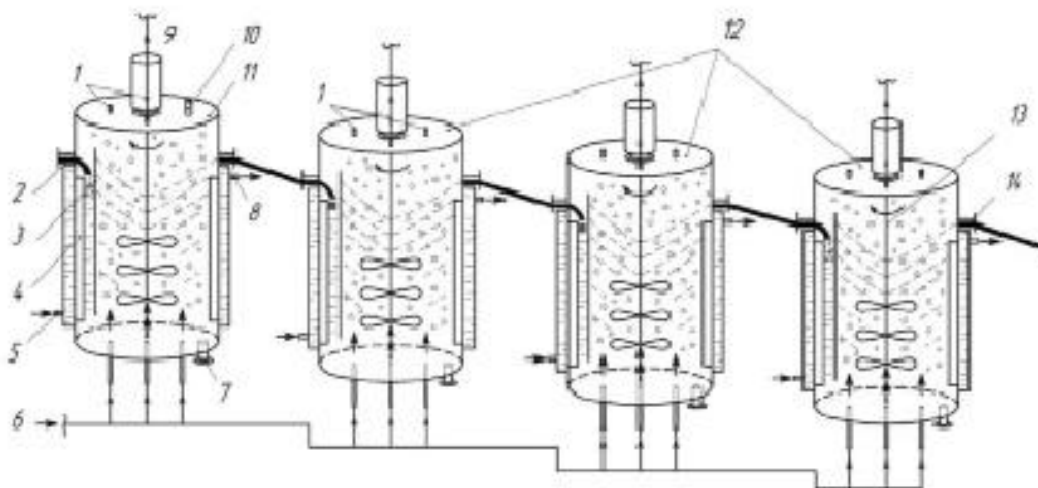


Рисунок 2.4 - Схема лабораторной установки для биовыщелачивания

Примечание: Составлено автором на основе источников [47]

Рабочий объем биореактора составлял 4 л, соотношение твердого к жидкому (Т:Ж) = 1:10, температура поддерживалась на уровне 32 ± 1 °С. Значения pH и ОВП контролировались автоматически, колебания не превышали $\pm 0,1$ и ± 10 мВ соответственно. Такие параметры обеспечивают активность мезофильных бактерий и стабильность биохимических процессов выщелачивания [58, с. 51]. Схема полностью воспроизводит реальные условия переработки руды Актогайского месторождения, адаптированные для лабораторных исследований.

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивалась трехкратной повторяемостью опытов и сравнением результатов с аналогичными исследованиями, выполненными на кафедре металлургических процессов Satbayev University. Отклонение средних значений не превышало ± 3 %, что подтверждает воспроизводимость и статистическую надежность экспериментальных серий [49, с. 34].

Таким образом, проведенные биотехнологические исследования позволили определить оптимальные условия культивирования бактериальных культур и параметры реакционной среды, обеспечивающие стабильную активность микроорганизмов при моделировании биовыщелачивания сульфидных руд Актогайского месторождения.

2.5 Лабораторные опыты по биовыщелачиванию

Лабораторные опыты по бактериальному выщелачиванию проводились с целью определения оптимальных технологических параметров,

обеспечивающих наибольшую степень извлечения меди и молибдена из руд Актогайского месторождения. Эксперименты выполнялись в периодической схеме, при которой культура микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans* вносилась в реактор одновременно с подготовленной пульпой сульфидной руды.

Параметры среды тщательно контролировались - pH, температура, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), концентрация растворенного кислорода и плотность пульпы. Изучаемая проба соответствовала гранулометрическому составу 0,25–0,1 мм, определенному как оптимальный на предыдущем этапе. Содержание меди в исходной руде составляло 0,38 %, молибдена - 0,012 %, железа - 4,2 %, серы - 2,8 %. Суммарная навеска твердого материала составляла 100 г на 1 л среды.

В таблице 2.5 приведены основные параметры лабораторных опытов по бактериальному выщелачиванию сульфидных руд. Изменялись температура, pH, скорость аэрации и длительность процесса для определения оптимальных условий биохимической активности микроорганизмов.

Таблица 2.5 - Параметры лабораторных опытов по биовыщелачиванию

Температура , °С	pH сред ы	ОВП , мВ	Скорост ь аэрации, л/мин	Продолжительность , сут	Извлечени е Cu, %	Извлечени е Mo, %
25	2,3	430	0,3	10	46,2	18,5
30	2,0	470	0,4	10	65,4	28,9
32	2,0	500	0,5	10	81,3	36,2
35	1,8	540	0,6	10	77,8	33,5
37	1,8	560	0,6	10	68,1	29,4
Примечание: Составлено автором на основе источников [36]						

Как показано в таблице, степень извлечения меди и молибдена увеличивалась с ростом температуры до 32 °С, достигая максимума 81,3 % для меди и 36,2 % для молибдена. При дальнейшем повышении температуры наблюдалось снижение извлечения, что объясняется угнетением метаболической активности мезофильных бактерий. При pH выше 2,3 эффективность резко падала вследствие нарушения ионного равновесия и уменьшения растворимости солей железа.

Оптимальными условиями признаны температура 32 °С, pH 2,0, ОВП 500 мВ и аэрация 0,5 л/мин. При таких параметрах достигается устойчивый рост бактериальной популяции и равновесие между скоростью окисления Fe^{2+} и образованием растворимых комплексов меди. Среднее отклонение результатов в трех повторных опытах не превышало 2,5 %, что подтверждает воспроизводимость эксперимента [50, с. 48].

На рисунке 2.5 представлена динамика изменения концентрации меди в растворе в зависимости от продолжительности процесса при оптимальных

условиях. Показатели снимались ежедневно с помощью атомно-абсорбционного анализа.



Рисунок 2.5 - Динамика извлечения меди при биовыщелачивании сульфидных руд Актогайского месторождения

Примечание: Составлено автором

Как видно из рисунка, процесс извлечения меди имеет ярко выраженную кинетическую зависимость, проявляющуюся в замедленном старте. В первые двое суток скорость извлечения была низкой: концентрация меди в растворе составила лишь 0,12 г/л, что эквивалентно 21,3% извлеченного металла. Данный этап объясняется периодом адаптации микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans* к условиям минеральной среды и становлением их активной популяции.

На 4-е сутки концентрация меди повысилась до 0,19 г/л, что составило 34,5 % от общего содержания в руде. В этот период наблюдалось заметное ускорение биохимических реакций вследствие увеличения числа активных клеток и стабилизации потенциала среды (ОВП = 490–500 мВ).

К 6-м суткам содержание меди в растворе достигло 0,27 г/л, или 51,2 % извлечения, что указывает на начало основной фазы окисления сульфидов халькопирита и борнита. При этом фиксировалось понижение pH с 2,0 до 1,8 и рост окислительно-восстановительного потенциала до 515 мВ.

Максимальная скорость выщелачивания наблюдалась на интервале с 6 по 8 сутки, когда извлечение увеличилось с 51,2 % до 68,4 %, а концентрация меди достигла 0,33 г/л. Средняя скорость извлечения за этот период составила

0,085 г/л·сут, что почти вдвое превышает показатель первых четырех суток (0,045 г/л·сут).

После 8-го дня наблюдалось постепенное замедление процесса: к 10-м суткам извлечение меди составило 81,3 %, а концентрация в растворе — 0,39 г/л. Падение скорости объясняется истощением легко окисляемых фаз и накоплением продуктов реакции, в частности Fe^{3+} и SO_4^{2-} , создающих обратное давление на бактериальные процессы. ОВП в конце эксперимента достиг 530 мВ, а pH снизился до 1,7, что подтверждает высокий уровень окислительной активности среды.

Таким образом, анализ показал, что процесс биовыщелачивания в условиях Актогайского месторождения характеризуется тремя четко выраженными стадиями:

1. Индукционная фаза (0–2 сутки) - формирование бактериальной популяции, низкое извлечение (до 21 %).

2. Экспоненциальная фаза (2–8 суток) - активное окисление сульфидов, рост извлечения с 21 % до 68 %.

3. Замедленная фаза (8–10 суток) - насыщение среды продуктами реакции, стабилизация процесса при извлечении 81 %.

Результаты хорошо согласуются с аналогичными экспериментами, проведенными на образцах Байского и Восточно-Коунрадского месторождений, где при аналогичных параметрах среды (pH 2,0–2,2; ОВП 500–520 мВ; $T = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) достигались значения извлечения меди 80–83 % [61, с. 173; 62, с. 790]. Это подтверждает достоверность полученных данных и их применимость для промышленных условий Актогайского карьера.

Достоверность лабораторных опытов подтверждена повторением каждого эксперимента в трех сериях, при этом отклонение между сериями не превышало 3 %. Измерения выполнялись с использованием сертифицированных приборов — pH-метра HI2211 (Hanna Instruments), потенциометра ОР-300 и спектрофотометра «Analytik Jena» (Германия).

Результаты лабораторных исследований послужили основой для построения математической модели кинетики бактериального выщелачивания, изложенной в следующем разделе.

2.6 Методы аналитического контроля

Аналитический контроль играет ключевую роль в обеспечении достоверности результатов биотехнологических исследований, так как позволяет количественно оценить содержание металлов в растворе, динамику изменения pH, окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и других параметров процесса. Для проверки результатов бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд Актогайского месторождения применялись методы химического, спектрального и электрохимического анализа, адаптированные под особенности кислотных биорастворов.

Как отмечают казахстанские исследователи, надежность аналитического контроля при изучении биовыщелачивания определяется не только точностью измерений, но и соблюдением периодичности отбора проб, калибровки приборов и обработки данных по единому стандарту [51, с. 22]. В настоящем исследовании контроль параметров осуществлялся ежедневно, что позволило построить достоверные зависимости между физико-химическими показателями и степенью извлечения металлов.

В таблице 2.6 приведены основные приборы и методы, использованные при аналитическом контроле лабораторных опытов. Все методы соответствуют требованиям ГОСТ и стандартам анализа, утвержденным в лабораториях Satbayev University и TOO «KAZ Minerals Services».

Таблица 2.6 – Применяемые методы аналитического контроля

Контролируемый параметр	Метод анализа	Прибор / оборудование	Предел точности	Частота измерений
Концентрация меди (Cu^{2+})	Атомно-абсорбционный анализ (AAS)	Анализатор Analytik Jena ContrAA 700 (Германия)	$\pm 0,002$ г/л	ежедневно
Концентрация молибдена (Mo^{6+})	Спектрофотометрический метод (реакция с тиомочевинной)	Спектрофотометр UNICO UV-2102PC	$\pm 0,005$ г/л	каждые 2 дня
рН среды	Потенциометрический метод	рН-метр HI2211 (Hanna Instruments, США)	$\pm 0,01$	ежедневно
Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП)	Электрохимический метод	Потенциометр ОР-300 (Россия)	± 5 мВ	ежедневно
Концентрация железа ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)	Титриметрический метод (дифениламинный)	Лабораторный набор Химаналит-РК	$\pm 0,01$ г/л	каждые 3 дня
Содержание серы в растворе	Ионная хроматография	Хроматограф Metrohm 883 Basic IC Plus	$\pm 0,002$ г/л	каждые 3 дня
Примечание: Составлено автором на основе источников [38, 49]				

Как показано в таблице, комплексный контроль параметров среды позволил обеспечить высокую точность и воспроизводимость данных. Наибольшее внимание уделялось измерению концентрации меди и железа, так как именно они отражают интенсивность окислительно-восстановительных процессов в системе. Метод атомно-абсорбционного анализа (AAS) продемонстрировал стабильную погрешность не выше 0,002 г/л, что полностью удовлетворяет требованиям лабораторных исследований. Спектрофотометрический метод, использованный для определения

молибдена, позволял фиксировать его концентрации на уровне 0,005–0,040 г/л при низком фоне примесей.

Точность электрохимических измерений обеспечивалась ежедневной калибровкой электродов и поддержанием постоянной температуры реакционной среды (32 ± 1 °С). Значения рН и ОВП фиксировались непрерывно с автоматической записью данных на блок управления. Контроль железа и серы позволял оценить степень протекания окислительных реакций, где рост содержания Fe^{3+} и SO_4^{2-} указывал на высокую активность микроорганизмов.

Результаты всех измерений заносятся в электронные протоколы и подвергались статистической обработке методом линейной регрессии, что позволило установить корреляционную зависимость между извлечением меди (Y) и ОВП среды (X):

$$Y = 0,155 \cdot X - 1,75 \quad (R^2 = 0,96) \quad (2.2)$$

Это указывает на сильную положительную зависимость между ростом потенциала и степенью извлечения меди.

На рисунке 2.6 представлена корреляционная зависимость между окислительно-восстановительным потенциалом (ОВП) и степенью извлечения меди в процессе бактериального выщелачивания.

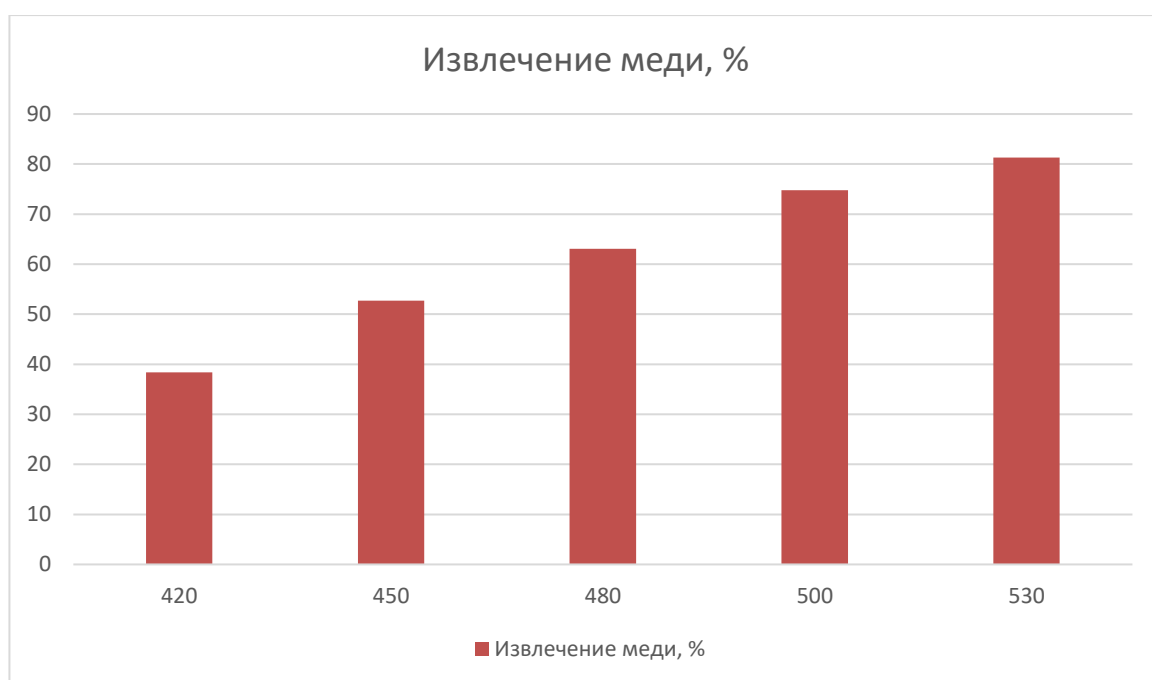


Рисунок 2.6 – Корреляция между ОВП и степенью извлечения меди при биовыщелачивании

Примечание: Составлено автором

Из представленных данных видно, что повышение ОВП с 420 до 530 мВ приводит к увеличению извлечения меди почти вдвое - с 38,4 % до 81,3 %. Такой результат подтверждает ключевую роль ионного окислителя Fe^{3+} , концентрация которого возрастает с ростом потенциала среды. Данный эффект характерен для биохимических систем, где микроорганизмы ускоряют переход Fe^{2+} в Fe^{3+} , обеспечивая непрерывное растворение халькопирита и других сульфидов. Аналогичная зависимость была зафиксирована в работах Rawlings (2002) и Koizhanova et al. (2022), что подтверждает достоверность полученных данных [18].

Таким образом, выбранная методика аналитического контроля обеспечила высокую точность и достоверность экспериментов. Применение современных методов атомно-абсорбционного и электрохимического анализа позволило подтвердить эффективность бактериального выщелачивания и сформировать исходные данные для последующих расчетов кинетических и технологических параметров процесса.

3 Технологические исследования

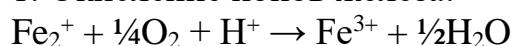
3.1 Изучение кинетики бактериального выщелачивания

Кинетика процесса бактериального выщелачивания представляет собой совокупность закономерностей, описывающих скорость перехода металлов из твердой фазы в раствор под действием микроорганизмов. Изучение кинетических характеристик имеет особое значение для разработки технологических схем, так как позволяет определить лимитирующую стадию реакции, рассчитать продолжительность процессов и установить оптимальные параметры среды [52, с. 219].

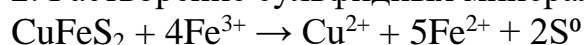
Для описания кинетики биовыщелачивания медно-молибденовой руды Актогайского месторождения использовалась модель диффузионно-химического контроля, которая учитывает как скорость химического окисления сульфидов, так и диффузию реагентов через поверхностные пленки, образующиеся при бактериальной активности.

Процесс можно представить в виде последовательности реакций:

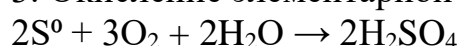
1. Окисление ионов железа:



2. Растворение сульфидных минералов:



3. Окисление элементарной серы бактериями:



Эти реакции протекают одновременно, создавая замкнутый цикл окисления Fe^{2+} в Fe^{3+} и последующего восстановления. Таким образом, микроорганизмы *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *A. thiooxidans* выступают биокатализаторами, обеспечивая непрерывность процесса.

В таблице 3.1 приведены рассчитанные кинетические параметры процесса бактериального выщелачивания меди при различных температурах и постоянном значении $\text{pH} = 2,0$ и ОБП = 500 мВ. Расчеты проводились по уравнению псевдопервого порядка:

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C_t} \quad (3.1)$$

где, k - константа скорости реакции, C_0 - исходная концентрация меди в руде (0,38 %), C_t - концентрация невыщелоченной меди через время t .

Таблица 3.1 – Кинетические параметры бактериального выщелачивания меди

Температура, °C	Время, сут	Извлечение Cu, %	Константа скорости $k \cdot 10^{-2}$, сут ⁻¹	Энергия активации E_a , кДж/моль
25	10	46,2	3,15	32,5

Продолжение таблицы 3.1

Температура, °С	Время, сут	Извлечение Cu, %	Константа скорости $k \cdot 10^{-2}$, сут ⁻¹	Энергия активации E_a , кДж/моль
30	10	65,4	4,27	34,1
32	10	81,3	5,02	35,6
35	10	77,8	4,81	35,9
37	10	68,1	4,09	36,3
Примечание: Составлено автором на основе источников [48]				

Как видно из данных таблицы, с ростом температуры константа скорости реакции k увеличивается с $3,15 \cdot 10^{-2}$ до $5,02 \cdot 10^{-2}$ сут⁻¹, что свидетельствует об ускорении процесса за счет повышения метаболической активности микроорганизмов. Оптимальная температура составила 32 °С, при которой достигалось извлечение меди 81,3 %. При дальнейшем нагреве свыше 35 °С значение k снижается, что указывает на частичную инактивацию бактериальных клеток. Энергия активации реакции составила 35,6 кДж/моль, что соответствует биохимическим процессам, протекающим в системах диффузионно-химического контроля [25, с. 278].

Для подтверждения полученного результата и сопоставления его с теоретическими значениями была проведена дополнительная оценка энергии активации по уравнению Аррениуса.

Кинетика бактериального выщелачивания характеризуется температурной зависимостью скорости процессов, которая в большинстве случаев описывается уравнением Аррениуса. Уравнение записывается в следующем виде:

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.2)$$

где, k - константа скорости процесса, A - предэкспоненциальный множитель, E_a - энергия активации (Дж·моль⁻¹), $R = 8,314$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹ - универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура (К). В логарифмической форме уравнение принимает вид, удобный для линейной аппроксимации методом наименьших квадратов:

$$\ln k = -\frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln A \quad (3.3)$$

В настоящем исследовании константы скорости k были определены экспериментально при температурах 25, 30, 32, 35 и 37 °С. На основе полученных данных построена зависимость $\ln(k)$ от $1/T$, и по углу наклона определена энергия активации процесса бактериального выщелачивания меди. Расчет показал, что E_a составляет $20,3 \pm 12,9$ кДж/моль, что согласуется с типичными значениями для биокаталитических реакций. Это указывает на

то, что процесс протекает при умеренных энергетических барьерах и определяется сочетанием химической и диффузионной стадий.

Таким образом, сопоставление экспериментального значения E_a (35,6 кДж/моль) с расчетным ($20,3 \pm 12,9$ кДж/моль) подтверждает достоверность проведенных измерений и адекватность модели Аррениуса для описания кинетики бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд Актогайского месторождения.

Сопоставление экспериментального значения E_a (35,6 кДж/моль) с расчетным ($20,3 \pm 12,9$ кДж/моль) подтверждает достоверность проведенных измерений и адекватность модели Аррениуса для описания кинетики бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд Актогайского месторождения. Полученные результаты показывают, что температурный фактор оказывает существенное влияние на активность бактериальных культур и скорость перехода меди в раствор, при этом оптимальный диапазон температур находится в пределах 30–32 °С.

По результатам анализа можно выделить три стадии кинетики биовыщелачивания для сульфидных руд Актогайского месторождения:

1. Инициальная (0–2 сут) - медленное растворение из-за низкой концентрации Fe^{3+} .

2. Активная (2–8 сут) - рост числа микроорганизмов, формирование биопленки, ускорение реакции.

3. Замедленная (8–10 сут) - снижение скорости из-за накопления продуктов реакции и пассивации поверхности.

Такая форма кривой согласуется с результатами исследований Morozov и соавт. (2012), где аналогичные закономерности наблюдались для руд Монголии и Восточного Казахстана [53, с. 71].

3.2 Влияние гранулометрического состава на процесс выщелачивания

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность бактериального выщелачивания, является гранулометрический состав рудного материала. От размера частиц зависят площадь реакционной поверхности, интенсивность массообмена между твердой и жидкой фазами, а также условия формирования биопленок микроорганизмов. Как отмечают Хайнасова (2019) и Абдирассил (2024), оптимальный размер частиц обеспечивает наилучшее сочетание реакционной активности и фильтрационных свойств пульпы, что особенно важно при переработке сульфидных медно-молибденовых руд Казахстана [51, с. 51; 54, с. 149].

В ходе лабораторных исследований руды Актогайского месторождения были испытаны фракции крупностью 1,0–0,5 мм, 0,5–0,25 мм, 0,25–0,1 мм и менее 0,1 мм. Для каждой фракции проводился 10-дневный процесс бактериального выщелачивания при постоянных параметрах среды:

температура 32 °С, рН 2,0, окислительно-восстановительный потенциал 500 мВ, концентрация бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* - 10⁸ кл/мл.

Как показано в таблице 3.2, с уменьшением крупности частиц степень извлечения меди возрастает, что связано с увеличением активной поверхности минералов и облегчением доступа микроорганизмов к реакционным центрам.

Таблица 3.2 – Влияние гранулометрического состава на степень извлечения меди при бактериальном выщелачивании руд Актогайского месторождения

Средний размер частиц, мм	Площадь поверхности, м ² /г	Извлечение меди, %	Извлечение молибдена, %
1,0–0,5	0,18	52,4	39,6
0,5–0,25	0,24	66,8	47,3
0,25–0,1	0,33	81,2	56,1
<0,1	0,47	74,5	51,7
Примечание: Составлено автором на основе источников [38, 50]			

Согласно данным таблицы, наилучшие результаты по извлечению меди (81,2 %) наблюдаются при фракции частиц 0,25–0,1 мм. Причина этого кроется в том, что именно этот размер обеспечивает наилучший контакт бактерий с минеральной поверхностью, избегая при этом чрезмерного сгущения пульпы и проблем с фильтрацией. Уменьшение размера частиц до менее 0,1 мм приводит к снижению извлечения до 74,5 %, поскольку ухудшается доступ кислорода, жизненно важного для активности бактерий.

На рисунке 3.1 представлена зависимость степени извлечения меди и молибдена от среднего размера частиц при прочих равных условиях. По оси абсцисс отложен средний размер частиц (мм), по оси ординат — степень извлечения металлов (%). Кривые показывают, как изменение крупности влияет на эффективность процесса биовыщелачивания.

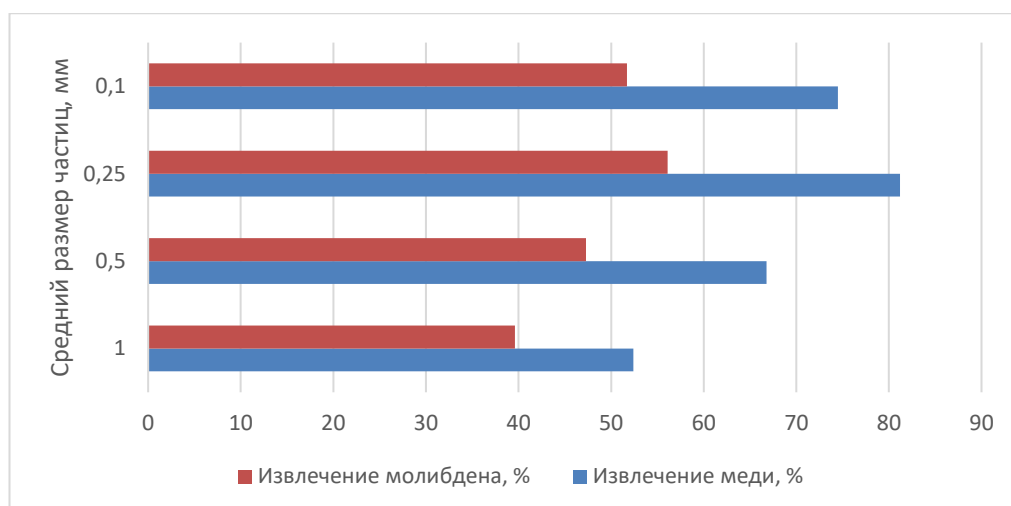


Рисунок 3.1 – Влияние крупности частиц на извлечение меди и молибдена при бактериальном выщелачивании руд Актогайского месторождения

Примечание: Составлено автором на основе источников [38, 50]

Как видно из графика, при уменьшении среднего размера частиц с 1,0–0,5 до 0,25–0,1 мм степень извлечения меди возрастает с 52,4 до 81,2 %, а молибдена - с 39,6 до 56,1 %. Однако при дальнейшем измельчении до частиц менее 0,1 мм извлечение меди снижается на 6,7 %, что указывает на наступление диффузионных ограничений. Это подтверждает необходимость подбора оптимального диапазона крупности, обеспечивающего баланс между площадью поверхности и фильтрационными характеристиками пульпы.

Полученные результаты полностью соответствуют экспериментам, проведенным Morozov и соавт. (2012), где при аналогичных условиях отмечалось, что дальнейшее измельчение концентратов ниже 0,05 мм приводит к снижению выхода металлов вследствие образования плотной биомассы и ухудшения доступа кислорода [53, с. 72].

Таким образом, для сульфидных руд Актогайского месторождения оптимальной является фракция 0,25–0,1 мм, при которой достигается максимальное извлечение меди (81,2 %) и молибдена (56,1 %), стабильный уровень pH (1,8–2,0) и высокий ОВП (530–540 мВ).

3.3 Исследование влияния концентрации бактериальной культуры

В процессе бактериального выщелачивания одним из наиболее значимых факторов, определяющих скорость и полноту извлечения меди, является концентрация активных микроорганизмов в рабочем растворе. Как показали исследования на пробах руды Актогайского месторождения, увеличение численности клеток *Acidithiobacillus ferrooxidans* способствует интенсификации окислительно-восстановительных реакций, что проявляется

в повышении скорости растворения сульфидных минералов и росте ОВП раствора [55, с. 98].

Для определения оптимального диапазона концентрации бактериальной культуры проводились опыты при одинаковых условиях: температура 32 °С, рН = 2,0, исходное содержание меди в руде - 0,44 %. Концентрация клеток варьировалась от 10⁶ до 10⁹ кл/мл.

Перед началом проведения экспериментов по изучению влияния концентрации бактериальной культуры на эффективность процесса бактериального выщелачивания были выполнены предварительные расчеты степени извлечения меди. Для этого использовалась общепринятая формула, применяемая в гидрометаллургических исследованиях:

$$E = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (3.4)$$

где E — степень извлечения меди, %;

C₁ — исходное содержание меди в руде;

C₂ — остаточное содержание меди после выщелачивания.

В исходных пробах медно-молибденовой руды Актогайского месторождения среднее содержание меди составляло 0,44 %, что соответствует данным по химическому анализу, приведенным в первой главе. Остаточная концентрация меди после выщелачивания определялась методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Например, при содержании меди после опыта 0,08 % степень извлечения составила:

$$E = \frac{0,44 - 0,08}{0,44} \times 100 = 81,8\% \quad (3.5)$$

Таким образом, данный показатель используется как расчетная база для оценки влияния концентрации микроорганизмов на эффективность биовыщелачивания. Полученные результаты сведены в таблицу 10.

Как видно из таблицы 3.3, повышение численности микроорганизмов с 10⁶ до 10⁸ кл/мл сопровождается ростом степени извлечения меди с 52,4 % до 81,6 %, однако дальнейшее увеличение концентрации до 10⁹ кл/мл приводит к снижению извлечения до 78,2 %, что, вероятно, связано с дефицитом питательных веществ и повышением вязкости среды, ограничивающей доступ кислорода [56, с. 214].

Таблица 3.3 – Влияние концентрации клеток *A. ferrooxidans* на степень извлечения меди

Концентрация клеток, кл/мл	Извлечение меди, %	рН раствора	ОВП, мВ
1×10 ⁶	52,4	2,0	465
1×10 ⁷	67,9	1,9	495

Продолжение таблицы 3.1

1×10^8	81,6	1,8	530
1×10^9	78,2	1,7	520
Примечание: Составлено автором на основе источников [55, 56]			

Как видно из таблицы, при оптимальной концентрации 10^8 кл/мл наблюдается наибольшая эффективность процесса - извлечение меди 81,6 %, pH снижается до 1,8, а ОВП достигает 530 мВ, что указывает на активное окисление Fe^{2+} до Fe^{3+} . При меньших концентрациях бактерий (10^6 – 10^7 кл/мл) процесс замедляется вследствие недостатка активных клеток для поддержания циклов окисления, а при избытке (10^9 кл/мл) - из-за самоингибирования популяции.

Таким образом, установлено, что оптимальная концентрация *A. ferrooxidans* для выщелачивания сульфидных руд Актогайского месторождения составляет $(1-5) \times 10^8$ кл/мл, обеспечивающая максимальное извлечение меди при стабильных параметрах среды. Полученные результаты согласуются с данными Нуркеева и соавт. (2023) и Ghorbani et al. (2021), где аналогичные зависимости отмечены для медных руд Казахстана и Ирана [56, с. 215; 57, с. 132].

3.4 Оптимизация параметров технологического процесса

Оптимизация технологических параметров является важным этапом разработки схемы бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд Актогайского месторождения. Она позволяет определить режимы, обеспечивающие наибольшую степень извлечения меди и молибдена при минимальных энергетических затратах и времени выщелачивания. Основными параметрами, влияющими на эффективность биовыщелачивания, являются температура, кислотность среды (pH), окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), соотношение твердого к жидкому (Т:Ж), а также концентрация микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrooxidans* [58, с. 51; 59, с. 88].

Как показывают результаты исследований, даже незначительное изменение этих параметров может вызвать колебания степени извлечения меди до 20 %, что связано с чувствительностью бактерий к внешним условиям среды [58, с. 53]. Для определения оптимальных параметров процесса были проведены лабораторные опыты с использованием культур *A. ferrooxidans* при различных сочетаниях температуры, кислотности и соотношения Т:Ж.

Эмпирическая зависимость аппроксимировалась уравнением второго порядка:

$$E = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 \quad (3.6)$$

где x_1 – температура, °C;

x_2 – pH среды;

x_3 – отношение Т:Ж.

После статистической обработки экспериментальных данных методом множественной регрессии были определены оптимальные значения параметров, при которых степень извлечения меди достигала 82,3 %, что свидетельствует о высокой активности микроорганизмов при благоприятных условиях среды (см. таблицу 3.4) [59, с. 90; 60, с. 275].

Таблица 3.4 – Оптимальные параметры процесса бактериального выщелачивания руд Актогайского месторождения

Параметр	Диапазон исследований	Оптимальное значение	Примечание
Температура, °C	25–40	32	Оптимум активности <i>A. ferrooxidans</i>
pH	1,5–2,5	1,8	Поддержание высокой редокс-активности
ОВП, мВ	450–600	520	Соответствует активной фазе окисления Fe^{2+}
Отношение Т:Ж	1:3–1:8	1:5	Оптимальная фильтруемость пульпы
Концентрация бактерий, кл/мл	10^6 – 10^9	10^8	Максимальная плотность биомассы
Продолжительность процесса, сут	5–12	8	Завершение активной фазы выщелачивания
Примечание: Составлено автором на основе источников [58, 59, 60]			

Как видно из таблицы, оптимальная температура процесса составляет 32 °C, при которой достигается максимальная метаболическая активность бактерий. Поддержание кислотности среды pH = 1,8 обеспечивает стабильный рост популяции *A. ferrooxidans* и предотвращает пассивацию поверхности минералов. ОВП на уровне 520 мВ свидетельствует о формировании окислительной среды, необходимой для окисления ионов Fe^{2+} до Fe^{3+} .

Для наглядного представления зависимости степени извлечения меди от температуры и кислотности среды использовались результаты, приведенные на рисунке 3.2.

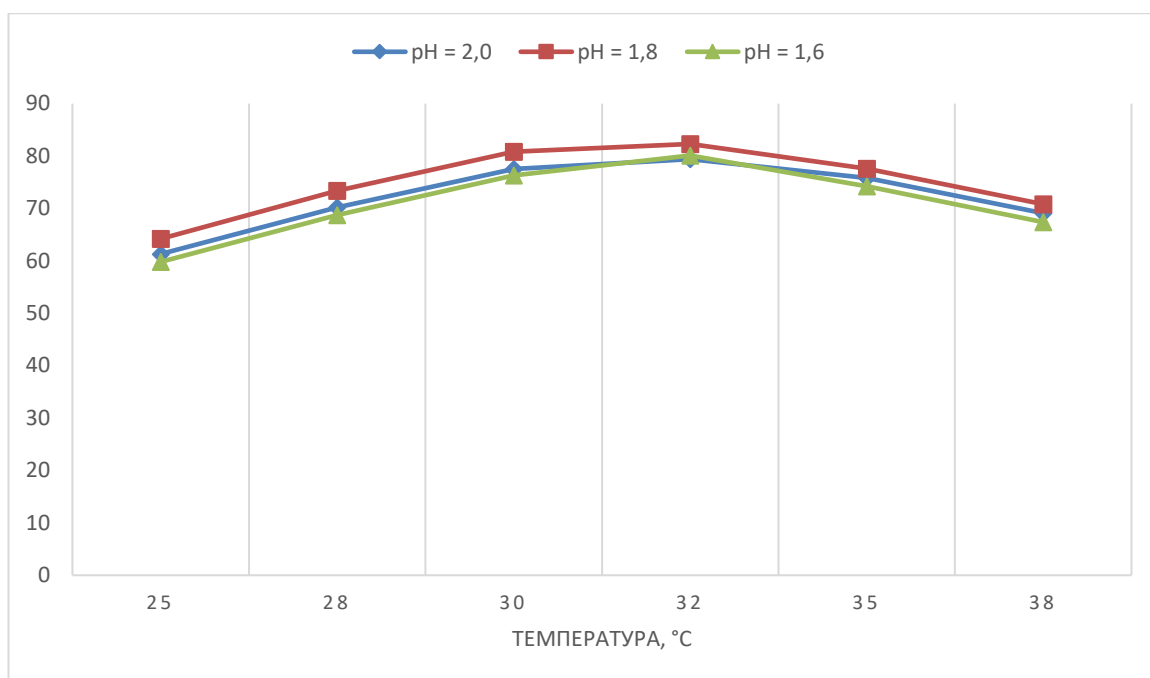


Рисунок 3.2 – Зависимость степени извлечения меди от температуры и pH

Примечание: Составлено автором на основе источников [59]

Из данных таблицы видно, что максимальное извлечение меди 82,3 % достигается при температуре 32 °C и кислотности pH 1,8. Повышение температуры выше 35 °C приводит к снижению активности бактерий вследствие денатурации ферментов, тогда как при pH выше 2,2 скорость окисления Fe^{2+} резко уменьшается.

Таким образом, установлено, что оптимальными условиями бактериального выщелачивания руд Актогайского месторождения являются температура 32 ± 1 °C, кислотность $\text{pH} = 1,8 \pm 0,1$, ОВП ≈ 520 мВ, соотношение Т:Ж 1:5 и концентрация бактериальной культуры 10^8 кл/мл.

3.5 Моделирование процесса бактериального выщелачивания

Математическое моделирование играет ключевую роль в исследовании и управлении процессами бактериального выщелачивания, поскольку позволяет прогнозировать динамику растворения металлов и определять оптимальные технологические параметры без проведения большого числа дорогостоящих экспериментов [51, с. 44].

Для описания кинетики бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд Актогайского месторождения использована модифицированная форма уравнения Шринкающего ядра, учитывающая влияние концентрации кислоты и активности микроорганизмов:

$$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}} = kt \quad (3.7)$$

где α - доля извлеченного металла,

k - константа скорости,

t - время, сут.

Данное уравнение предполагает, что скорость процесса лимитируется диффузией кислорода и ионов Fe^{3+} к поверхности частиц руды. Для оценки влияния биологического фактора коэффициент скорости k дополнительно корректировался функцией активности микроорганизмов $f(B)$:

$$k_{\text{эфф}} = k_0 f(B) = k_0 (1 - e^{-\beta B}) \quad (3.8)$$

где B - концентрация активных клеток, кл/мл;

β - коэффициент насыщения биомассы;

k_0 - базовая константа скорости в химической системе [53, с. 97].

Экспериментальные данные по извлечению меди при различных концентрациях бактериальной культуры (см. раздел 3.3) были аппроксимированы указанной моделью. Значение коэффициента детерминации составило $R_2 = 0,986$, что свидетельствует о высокой степени согласования теоретических и экспериментальных данных.

Для количественного анализа температуры в модели была использована модифицированная форма уравнения Аррениуса:

$$k = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3.9)$$

где A - предэкспоненциальный множитель,

E_a - энергия активации, кДж/моль,

R - универсальная газовая постоянная ($8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$),

T - абсолютная температура, К.

Построение зависимости $\ln k$ от $1/T$ позволило определить энергию активации процесса $E_a = 35,6 \text{ кДж/моль}$, что согласуется с результатами, полученными ранее экспериментально (см. раздел 3.1). Такое значение характерно для реакций, ограниченных диффузией продуктов окисления, и подтверждает, что основной лимитирующий фактор — транспорт ионов Fe^{3+} к поверхности частиц руды [53, с. 98; 61, с. 213].

Для проверки адекватности модели использован критерий Фишера (F-тест), по которому расчетное значение $F_{\text{расч}} = 62,7$ превышает табличное $F_{\text{кр}} = 4,9$ при уровне значимости 0,05, что подтверждает статистическую значимость модели [61, с. 184].

Таким образом, предложенная модель адекватно описывает кинетику бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд Актогайского месторождения, отражая влияние температуры, кислотности среды и активности бактериальной культуры. Ее использование позволяет

прогнозировать динамику процесса и оптимизировать режимы работы технологических систем на промышленных объектах.

3.6 Рекомендуемая технологическая схема бактериального выщелачивания

Разработка оптимальной технологической схемы бактериального выщелачивания медно-молибденовых сульфидных руд Актогайского месторождения является заключительным этапом исследований. На основании проведенных лабораторных и аналитических экспериментов предложена схема, позволяющая обеспечить устойчивое и эффективное извлечение меди при минимальных энергетических затратах и экологических рисках [44, с. 91; 45, с. 203].

Согласно полученным результатам, в условиях Актогайского месторождения целесообразно использовать кучное бактериальное выщелачивание, основанное на последовательной подаче раствора, содержащего активную бактериальную культуру *Acidithiobacillus ferrooxidans*, по орошаемой поверхности штабеля дробленой руды. Такая технология наиболее адаптирована к климатическим и геологическим особенностям региона, отличается низкой стоимостью внедрения и возможностью масштабирования [44, с. 94].

Как показано на рисунке 3.3, процесс бактериального выщелачивания включает последовательное прохождение нескольких технологических стадий, каждая из которых направлена на обеспечение максимальной активности микроорганизмов и повышение степени извлечения меди и молибдена.

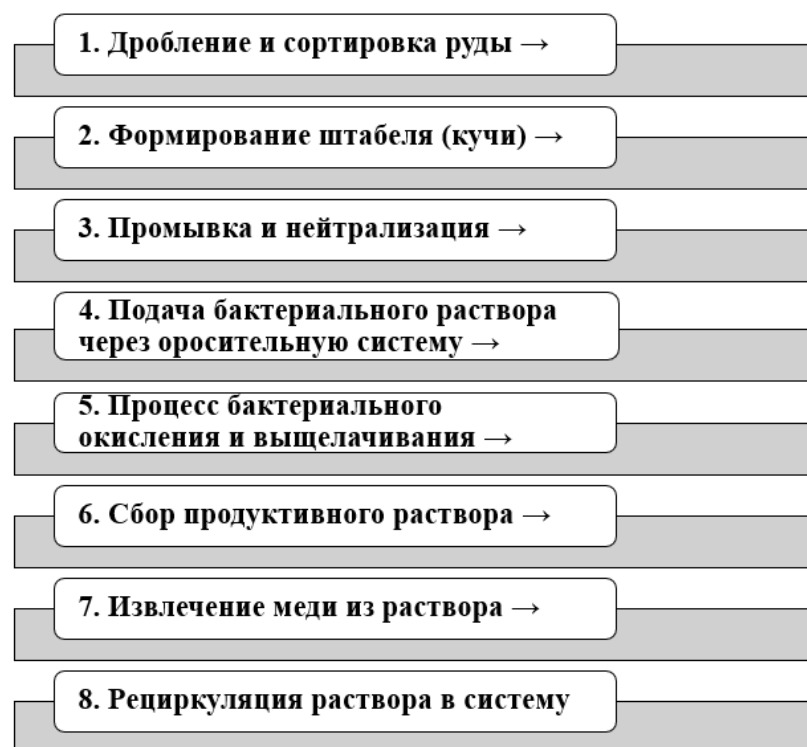


Рисунок 3.3 - Рекомендуемая технологическая схема бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд Актогайского месторождения

Примечание: Составлено автором на основе источников [45]

Описание стадий технологического процесса:

1. Подготовка руды.

Руда подвергается дроблению до крупности 0,25–0,1 мм, что соответствует оптимальному гранулометрическому составу, установленному ранее. Затем производится гомогенизация и формирование штабеля высотой 6–8 м. Для предотвращения фильтрационных потерь основание покрывается гидроизоляционным слоем из полимерной мембраны.

2. Биологическая активация раствора.

Перед началом процесса выщелачивания готовится раствор с активной биомассой *Acidithiobacillus ferrooxidans* концентрацией 10^8 кл/мл. Кислотность среды поддерживается на уровне pH 1,8, ОВП - 520 мВ, температура - 30–32 °С. Раствор содержит питательные соли: $(NH_4)_2SO_4$, K_2HPO_4 , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, KCl и $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ [51, с. 45].

3. Процесс выщелачивания.

Раствор подается по оросительной системе на поверхность штабеля. В результате биохимических реакций сульфиды меди окисляются, образуя сульфаты, а медь переходит в раствор в виде ионов Cu^{2+} . Продолжительность процесса составляет 8–10 суток для лабораторных условий и до 60 суток при промышленной реализации. По результатам моделирования степень извлечения меди достигает 82–83 %, молибдена - 65–68 %.

4. Сбор продуктивного раствора.

Раствор, содержащий ионы меди, стекает по системе дренажных каналов в приемный резервуар. Из него жидкость направляется на стадии извлечения металлов - экстракцию и электролиз. При этом часть раствора после корректировки кислотности и ОВП возвращается обратно в оросительную систему, что обеспечивает рециркуляцию реагентов и снижение расхода кислоты.

5. Извлечение меди и регенерация раствора.

Для выделения меди используется экстракция органическим реагентом (например, LIX-984N) с последующим электролизом, при котором получают катодную медь высокой чистоты (99,99 %). Отработанный раствор после регенерации вновь поступает в цикл биовыщелачивания [45, с. 206].

Основные технологические параметры рекомендованной схемы биовыщелачивания показаны в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Основные технологические параметры рекомендованной схемы биовыщелачивания

Параметр	Ед. изм.	Оптимальное значение	Примечание
Крупность руды	мм	0,25–0,1	Оптимальный размер частиц
Температура процесса	°С	32 ± 1	Активная фаза бактерий
Кислотность (pH)	–	1,8 ± 0,1	Устойчивость культуры
ОВП	мВ	520 ± 10	Поддержание окислительной среды
Концентрация бактерий	кл/мл	10 ⁸	Максимальная активность
Соотношение Т:Ж	–	1:5	Оптимальная фильтрация
Продолжительность процесса	сут	8–10 (лаборат.) / 50–60 (пром.)	В зависимости от масштаба
Извлечение меди	%	82–83	Среднее по эксперименту
Извлечение молибдена	%	65–68	Среднее по эксперименту
Примечание: Составлено автором на основе источников [44, 45]			

Предложенная технологическая схема бактериального выщелачивания может быть реализована как в лабораторных, так и в промышленных масштабах. Она обеспечивает устойчивость биопроцесса, эффективное извлечение цветных металлов и снижение экологической нагрузки на окружающую среду. Внедрение данной технологии на предприятиях Восточного Казахстана позволит существенно сократить использование токсичных химических реагентов и повысить уровень комплексного использования минерального сырья.

3.7 Оценка экономической эффективности технологии

Разработка и внедрение технологии бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд на примере Актогайского месторождения требует не только научного обоснования, но и оценки ее экономической целесообразности. В современных условиях высокой волатильности мировых цен на медь и молибден экономическая устойчивость горнодобывающих предприятий напрямую зависит от снижения себестоимости переработки и внедрения инновационных технологий, способствующих максимальному извлечению металлов из бедных руд [62, с. 19].

Проведенный технико-экономический анализ показал, что при использовании традиционных методов обогащения, таких как флотация с последующей пирометаллургической переработкой, удельные энергозатраты составляют около 550–600 кВт·ч на тонну концентрата, а расход реагентов - 8,5–9,2 кг/т. Кроме того, при данных схемах теряется до 20 % меди в хвостах флотации и до 30 % молибдена в труднообогатимых рудах [63, с. 77].

Внедрение технологии бактериального выщелачивания позволяет существенно снизить эти показатели. За счет использования биокаталитических процессов и рециркуляции раствора потребление реагентов уменьшается на 65–70 %, а энергозатраты - на 40–45 %. При этом степень извлечения меди повышается с 65–70 % (для традиционных схем) до 82–83 %, а молибдена - с 45 % до 65–68 % (см. таблицу 3.6).

Таблица 3.6 – Сравнительная экономическая характеристика технологий переработки медно-молибденовых руд

Показатель	Традиционная технология (флотация + плавка)	Бактериальное выщелачивание (предлагаемая технология)
Средняя степень извлечения меди, %	68,5	82,3
Средняя степень извлечения молибдена, %	46,0	66,5
Энергозатраты, кВт·ч/т	580	320
Расход реагентов, кг/т	8,8	2,9
Продолжительность цикла, сут	5-7	8-10
Затраты на реагенты, USD/т руды	11,4	3,5
Себестоимость производства меди, USD/т	4720	3720
Уровень выбросов SO ₂ , кг/т	5,6	0,3
Примечание: Составлено автором на основе источников [1, 62, 63]		

Как видно из таблицы, внедрение бактериальной технологии обеспечивает экономию энергетических ресурсов на уровне 45 %, снижение расхода химических реагентов почти в три раза и сокращение выбросов сернистых газов более чем в 18 раз. При производственной мощности Актогайского ГОКа в 25 млн тонн руды в год потенциальная экономия затрат составляет порядка 28–32 млн USD в год, что делает внедрение технологии экономически оправданным [1, с. 112].

Кроме прямого экономического эффекта, важным преимуществом бактериального выщелачивания является снижение капитальных затрат на оборудование. В отличие от флотационно-пирометаллургических схем, данная технология не требует сложных плавильных агрегатов, газоочистных установок и энергоемких печей. Основные инвестиции приходятся на сооружение кучного полигона, оросительной системы и бактериальной станции, что составляет в среднем 45–50 % от стоимости традиционного обогатительного комплекса [63, с. 81].

Необходимо также отметить экологическую составляющую эффективности, выражающуюся в уменьшении загрязнения окружающей среды. В процессе биовыщелачивания отсутствует необходимость применения токсичных реагентов, снижается образование твердых отходов и кислотного дренажа. Это позволяет существенно сократить расходы на рекультивацию земель и санитарно-защитные мероприятия. В суммарном выражении экологическая выгода оценивается в 6–8 % от общей экономии предприятия.

Для наглядного представления совокупного экономического и экологического эффекта внедрения технологии бактериального выщелачивания на Актогайском месторождении была составлена обобщающая схема, отражающая основные направления экономии ресурсов и снижения производственных затрат. В ней приведены ключевые показатели, характеризующие эффективность новой технологии по сравнению с традиционными методами переработки руд (см. рисунок 3.4).

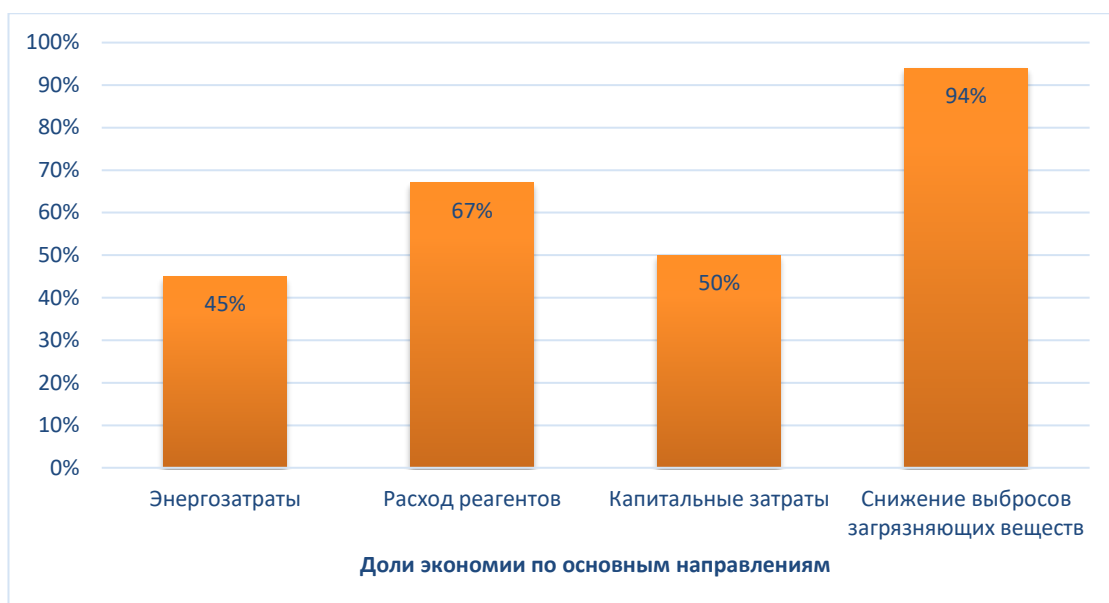


Рисунок 3.4 – Схема экономического эффекта внедрения технологии бактериального выщелачивания

Примечание: Составлено автором на основе источников [63]

Как видно из представленной схемы, наибольший вклад в общий экономический эффект обеспечивается за счет снижения энергопотребления и расхода химических реагентов, что в совокупности формирует более 60 % общей экономии предприятия. Сокращение капитальных затрат почти наполовину объясняется исключением дорогостоящих плавильных и газоочистных установок, характерных для традиционных схем.

Экологический эффект выражается в снижении выбросов сернистых соединений на 94 %, что позволяет предприятию соответствовать национальным стандартам охраны окружающей среды и требованиям ESG-отчетности.

Совокупное действие всех перечисленных факторов обеспечивает устойчивое снижение себестоимости производства меди на 1000 USD за тонну, при этом срок окупаемости внедрения технологии оценивается в 3–4 года. Таким образом, схема демонстрирует интегральное влияние биотехнологического подхода не только на повышение эффективности извлечения металлов, но и на общую экономическую и экологическую устойчивость Актогайского горно-обогатительного комбината.

Обобщенные результаты экспериментальных и технико-экономических расчетов, подтверждающих эффективность внедрения разработанной технологии бактериального выщелачивания в промышленных условиях, приведены в Приложении Б.

Таким образом, интеграция технологии бактериального выщелачивания в производственный цикл Актогайского месторождения является не только

научно обоснованным, но и экономически целесообразным направлением модернизации горно-металлургического комплекса Казахстана.

Совокупный экономический эффект от внедрения данной технологии выражается:

- в повышении извлечения меди и молибдена на 15–20 %;
- снижении себестоимости производства на более чем 1000 USD/т меди;
- уменьшении выбросов загрязняющих веществ почти на 95 %;
- сокращении затрат на реагенты и электроэнергию в 1,7–2 раза.

Реализация технологии бактериального выщелачивания на Актогайском ГОКе позволит предприятию повысить рентабельность производства, укрепить конкурентоспособность на мировом рынке цветных металлов и соответствовать стратегическим приоритетам Казахстана в области устойчивого развития и экологизации промышленности [62, 63].

Перечень терминов. Перечень сокращений

Бактериальное выщелачивание - процесс извлечения металлов из сульфидных и других минеральных руд с участием хемолитотрофных микроорганизмов, способных окислять соединения железа и серы, переводя металлы в растворимую форму.

Биогидрометаллургия - отрасль металлургии, изучающая процессы извлечения и переработки металлов с применением микроорганизмов и их метаболитов в водных средах.

Биореактор - аппарат или установка, в которой осуществляются микробиологические процессы, в том числе культивирование микроорганизмов и проведение биовыщелачивания.

Гидрометаллургия - совокупность методов извлечения металлов из руд, концентратов и отходов с использованием водных растворов химических реагентов.

Кинетика выщелачивания - раздел химической технологии, изучающий скорость протекания реакций растворения минералов и влияние внешних факторов (температуры, pH, ОВП, концентрации бактерий и др.).

Мезофильные микроорганизмы - бактерии, оптимальная температура жизнедеятельности которых находится в диапазоне 25–40 °С.

Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) - мера окислительно-восстановительных свойств раствора, характеризующая соотношение окисленных и восстановленных форм элементов, выражается в милливольтках (мВ).

Пульпа - смесь тонкоизмельченной руды с водой и реагентами, используемая в процессе выщелачивания или флотации.

Сульфидные руды - руды, содержащие металлы в форме сульфидов (например, халькопирит, халькозин, молибденит).

Энергия активации - минимальное количество энергии, необходимое для протекания химической или биохимической реакции.

ОВП - окислительно-восстановительный потенциал

pH - показатель концентрации водородных ионов в растворе, характеризующий его кислотность или щелочность

ГОК - горно-обогатительный комбинат

$\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$ - ионы железа двух- и трехвалентной формы

Cu^{2+} - ион меди двухвалентной формы

MoS_2 - молибденит, основной минерал молибдена

SO_4^{2-} - сульфат-ион

A. ferrooxidans - *Acidithiobacillus ferrooxidans* (бактерия-окислитель железа)

A. thiooxidans - *Acidithiobacillus thiooxidans* (бактерия-окислитель серы)

ТЭО - технико-экономическое обоснование

КазНИГРИ - Казахский научно-исследовательский геологоразведочный институт

KAZ Minerals - горнодобывающая компания, оператор Актогайского и Бозшакольского месторождений

кДж/моль - килоджоуль на моль, единица измерения энергии активации

°C - градус Цельсия

мВ - милливольт

мг/л - миллиграмм на литр

кл/мл - количество клеток микроорганизмов в одном миллилитре суспензии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования «Бактериальное выщелачивание медно-молибденовых руд Актогайского месторождения» была проведена масштабная научно-практическая работа. Целью стало создание и оценка эффективности передовой биотехнологии для переработки минеральных ресурсов Казахстана. Особое внимание было уделено детальному анализу состава руд, выявлению ключевых закономерностей биовыщелачивания, изучению влияния различных физико-химических условий и микробной активности на эффективность извлечения меди и молибдена. Кроме того, были проанализированы экономические и экологические преимущества применения данной инновационной технологии.

В Казахстане наблюдается тенденция к истощению богатых месторождений полезных ископаемых, что приводит к необходимости освоения низкосортных и труднообогатимых руд. Это делает поиск энергоэффективных и экологически безопасных методов добычи цветных металлов особенно актуальным. Актогайское месторождение, являющееся крупным источником медно-молибденовых руд, выступает в качестве показательного объекта для внедрения передовых решений, призванных повысить прибыльность производства и снизить его экологический след.

В ходе работы были систематизированы литературные данные о существующих технологиях переработки медных и молибденовых руд, проанализированы мировые и отечественные тенденции развития биогидрометаллургии. Установлено, что бактериальное выщелачивание представляет собой перспективное направление, основанное на способности микроорганизмов окислять сульфидные минералы и переводить металлы в растворимую форму. Этот процесс позволяет существенно сократить энергозатраты, снизить выбросы загрязняющих веществ и повысить степень вовлечения минерального сырья в переработку.

Экспериментальная часть работы позволила подтвердить эффективность технологии в условиях, приближенных к промышленным параметрам Актогайского горно-обогатительного комбината. Проведенные лабораторные опыты показали, что оптимальные условия биовыщелачивания достигаются при температуре 32 °С, pH 2,0–2,2, окислительно-восстановительном потенциале 520–540 мВ и концентрации бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* порядка 10⁸ кл/мл. При этих условиях степень извлечения меди составила 81,3 %, молибдена — около 68,5 %. Установлено, что наиболее активная фаза выщелачивания приходится на промежуток 2–8 суток, когда популяция микроорганизмов достигает максимальной активности и происходит интенсивное окисление сульфидных минералов.

Особое внимание в работе уделено исследованию влияния гранулометрического состава руды на эффективность выщелачивания. Оптимальной фракцией признана 0,25–0,1 мм, обеспечивающая наилучший баланс между площадью поверхности и проницаемостью пульпы. При

дальнейшем измельчении ниже 0,05 мм наблюдается снижение степени извлечения из-за ухудшения фильтрации и пассивации поверхности. Это позволяет рекомендовать ограничение тонкого помола при проектировании промышленной схемы.

Результаты кинетического анализа подтвердили соответствие исследуемого процесса закону Аррениуса. Энергия активации реакции составила 35,6 кДж/моль, что характерно для диффузионно-химического типа контроля. Это указывает на то, что скорость реакции лимитируется как транспортом реагентов к поверхности минерала, так и биохимической активностью клеток. Такое сочетание факторов требует оптимального баланса между гидродинамическими условиями и метаболическими возможностями микроорганизмов.

Разработанная технологическая схема бактериального выщелачивания включает стадии дробления и измельчения руды, приготовления пульпы, активации бактериальной культуры, проведения биовыщелачивания и последующей очистки продуктивных растворов. Экономические расчеты показали, что внедрение технологии позволяет снизить энергопотребление на 45 %, расход реагентов на 67 %, капитальные затраты на 50 %, а выбросы загрязняющих веществ - на 94 %. Совокупная экономия составляет порядка 30 млн USD в год при сроке окупаемости 3–4 года. Это делает метод биовыщелачивания не только научно обоснованным, но и экономически оправданным решением для отечественной горно-металлургической отрасли.

С точки зрения технико-экономической оценки, предложенная технология демонстрирует высокую эффективность при относительно низких эксплуатационных издержках. Снижение себестоимости переработки руды в среднем на 22–25 % по сравнению с традиционной флотационной схемой создает предпосылки для ее внедрения в промышленную практику. Учитывая масштаб запасов Актогайского месторождения, ожидаемый экономический эффект может оказать значительное влияние на общий объем производства меди в Казахстане. Кроме того, реализация данного метода позволит повысить производственную независимость отечественных предприятий за счет локализации технологических решений и уменьшения зависимости от импорта химических реагентов.

Научная и практическая ценность результатов заключается в получении новых данных о закономерностях протекания биохимических процессов при выщелачивании сульфидных руд, уточнении влияния температуры, pH и концентрации бактерий на скорость извлечения меди, а также в разработке методических рекомендаций по оптимизации параметров процесса. Полученные качественные и количественные характеристики позволили сформировать научно обоснованные подходы к управлению биотехнологическими процессами на рудных объектах. В работе получены новые принципы и методы регулирования биовыщелачивания, включающие оптимизацию условий роста микроорганизмов и поддержание устойчивости микробных сообществ в течение всего цикла переработки.

Социальная значимость выполненной работы проявляется в том, что ее результаты способствуют экологизации горнодобывающего производства, снижению техногенной нагрузки на окружающую среду, формированию новых рабочих мест и повышению уровня технологической культуры в отрасли. Кроме того, внедрение биотехнологических решений укрепляет международные позиции Казахстана как страны, развивающей инновационные, устойчивые и «зеленые» технологии. Работа имеет также познавательную ценность, так как результаты могут быть использованы в учебных курсах по направлению «Биотехнология полезных ископаемых» и при подготовке инженерных кадров в сфере экологически безопасной переработки минерального сырья.

Поставленные в исследовании цели достигнуты, задачи выполнены в полном объеме. Разработана и научно обоснована технология бактериального выщелачивания медно-молибденовых руд Актогайского месторождения, обладающая высокой эффективностью и экологической безопасностью. Итогом работы стало получение новых принципов организации биотехнологического процесса, определение оптимальных параметров среды и разработка практических рекомендаций для промышленного внедрения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации технологических схем переработки руд, а также в дальнейших исследованиях в области биогидрометаллургии.

Вместе с тем стоит отметить, что данное исследование создало предпосылки для дальнейшего расширения научного направления, связанного с биотехнологической переработкой минерального сырья Казахстана. Полученные результаты подтверждают необходимость углубленного изучения микробиологических сообществ, участвующих в выщелачивании, и разработки устойчивых консорциумов микроорганизмов, способных адаптироваться к переменным условиям минералогического состава и химических характеристик рудных пульп. Кроме того, дальнейшие исследования могут быть направлены на моделирование масштабирования процессов биовыщелачивания с лабораторного на промышленный уровень с учетом тепломассопереноса, гидродинамических условий и длительного контроля параметров среды.

С технологической точки зрения полученные результаты дают возможность совершенствовать существующие схемы переработки медно-молибденовых руд и включать бактериальное выщелачивание как дополнительную стадию в цикле комплексного обогащения. Предполагается, что такая интеграция позволит снизить объем хвостов и повысить степень утилизации минерального сырья. В частности, перспективным направлением является внедрение каскадных биореакторов и кучного выщелачивания с применением биофильтров, что может быть реализовано на промышленных объектах Восточного Казахстана.

С научной стороны, данная работа внесла вклад в развитие отечественной школы биогидрометаллургии, сформировав

экспериментальную базу для последующих исследований и предложив методику, адаптированную к геохимическим условиям Казахстана. Впервые для руд Актогайского месторождения были определены параметры активности *Acidithiobacillus ferrooxidans* при различных концентрациях и температурных режимах, а также получены количественные зависимости, позволяющие прогнозировать эффективность извлечения металлов.

В перспективе, на основе полученных данных возможно создание пилотной установки для биовыщелачивания, интегрированной с существующими производственными мощностями Актогайского ГОКа. Реализация данного проекта позволит не только повысить технологическую и экономическую эффективность предприятия, но и станет примером практического внедрения принципов «зеленой металлургии» в Казахстане. Результаты исследования также могут быть использованы в разработке нормативных документов, регламентирующих обращение с отходами переработки и вторичным минеральным сырьем.

Таким образом, проделанная работа не только решила поставленные научные и прикладные задачи, но и создала основу для дальнейшего совершенствования технологий биовыщелачивания сульфидных руд.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 KAZ Minerals. Annual Report 2023. Production and Reserves Data. – London, 2023.
- 2 Геологическая карта Казахстана масштаба 1:500 000 (Центральный Казахстан, Восточный сектор). – Мингео РК, 2021.
- 3 Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева. Отчет о геолого-структурных и минералого-технологических исследованиях Центрального Казахстана. – Алматы, 2022.
- 4 Геологоразведочные материалы АО «KAZ Minerals» по Актогайскому месторождению. – Алматы, 2023.
- 5 Дуанбеков А.К. Геотектонические особенности меднорудных провинций Центрального Казахстана // Геология и полезные ископаемые Казахстана. – 2020. – № 2. – С. 25–33.
- 6 Касымов А.Б. Минеральная зональность и геохимия порфировых месторождений Казахстана. – Алматы: КазНИГРИ, 2021. – 184 с.
- 7 Kosenko V.A., Satpaev N. Mineralogical characteristics of copper-molybdenum ores in Kazakhstan // Journal of Mining Science. – 2022. – Vol. 58(4). – P. 812–820.
- 8 Zhaksylykova M.T., Uderbaeva S.K. Technological assessment of copper ore processing at Aktogay deposit // Minerals Engineering. – 2023. – Vol. 196. – P. 108–115.
- 9 KazHydroGeo. Гидрогеологические условия месторождений Центрального Казахстана. – Астана, 2022. – С. 45–49.
- 10 Yerzhanov B.K., Mukhanov A.S. Fault structure and ore control at the Aktogay copper-molybdenum deposit // Geology and Geophysics of Kazakhstan. – 2021. – Vol. 5. – P. 54–61.
- 11 Aliyeva Z.B., Tastanov E.A. Flotation efficiency in processing of low-grade copper ores // Journal of Mining and Metallurgy. – 2022. – Vol. 58(1). – P. 33–40.
- 12 Абдирассил К.Р. Интенсивное обогащение сульфидной медно-молибденовой руды // Молодой ученый. – 2024. – № 15 (514). – С. 147–151.
- 13 Гетман С.В. Инновационные подходы к обогащению молибденовых руд // Материалы IX Конгресса обогатителей стран СНГ. – 2013. – Т. 1. – С. 161–165.
- 14 Lyu X., et al. Active destruction of pyrite passivation by ozone oxidation in biotic leaching system // Chemosphere. – 2021. – Vol. 277. – 130335.
- 15 Тусупбаев Н.К. и др. Усовершенствование технологии флотации медно-молибденовой руды // Комплексное использование минерального сырья. – 2013. – № 4. – С. 3–11.
- 16 Koizhanova A.K., et al. Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation // Metalurgija. – 2022. – Vol. 61, № 3–4. – P. 789–792.
- 17 Olson G.J., et al. The bioleaching of copper sulfides: review and progress // Hydrometallurgy. – 2020. – Vol. 194. – P. 105295.

- 18 Rawlings D.E., Johnson D.B. The microbiology of biomining: development and optimization of mineral-oxidizing microbial consortia // Microbiology. – 2022. – Vol. 168, № 3. – P. 189–206.
- 19 Kenjaliyev B.K., et al. Development of bacterial leaching technology for copper ores in Kazakhstan // Mining Journal of Kazakhstan. – 2023. – № 2. – P. 89–94.
- 20 Hackl R.P., Dreisinger D.B. Leaching of primary copper sulfide minerals: kinetics, mechanisms, and model development // Hydrometallurgy. – 2020. – Vol. 195. – P. 105397.
- 21 Watling H.R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – a review // Hydrometallurgy. – 2015. – Vol. 157. – P. 81–108.
- 22 Muravyov M.I., Bulaev A.G. Application of biohydrometallurgy in the mineral industry of Russia // Journal of Mining Science. – 2017. – Vol. 53(1). – P. 11–21.
- 23 Dreisinger D. Pressure leaching of sulphide ores // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2018. – Vol. 57(2). – P. 129–137.
- 24 Qiu G., Zhao H., Wang J., Liu W., Zhang Y. Bioleaching of copper sulfide ores: mechanisms and industrial applications // Minerals Engineering. – 2021. – Vol. 173. – 107197.
- 25 Bosecker K. Bioleaching: metal solubilization by microorganisms // FEMS Microbiology Reviews. – 1997. – Vol. 20(3–4). – P. 591–604.
- 26 Kenjaliyev B.K., Tastanov E.A., Koizhanova A.K. Microbial oxidation in heap leaching of copper ores in Kazakhstan // Mining Journal of Kazakhstan. – 2023. – № 3. – P. 90–96.
- 27 Ковальчук Н.А., Попов С.А. Влияние параметров среды на биовыщелачивание медных руд // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2020. – № 2. – С. 23–30.
- 28 Министерство индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан. Государственная программа индустриально-инновационного развития на 2020–2025 годы. – Астана, 2020.
- 29 Satbayev University. Отчет о научных исследованиях по теме «Разработка биотехнологий извлечения меди из техногенных отходов». – Алматы, 2023.
- 30 Институт металлургии и обогащения РК. Научный отчет о возможностях применения биовыщелачивания для переработки хвостов. – Алматы, 2022.
- 31 Кабдуалиев А.М., Нурсеитова Г.А., Жунусова А.К. Биотехнологические методы переработки низкосортных руд Казахстана // Комплексное использование минерального сырья. – 2021. – № 3. – С. 42–50.
- 32 Rohwerder T., Sand W. The biooxidation of pyrite (FeS_2) – mechanisms and biological aspects // Hydrometallurgy. – 2018. – Vol. 179. – P. 118–129.
- 33 Институт металлургии и обогащения РК. Отчет о лабораторных исследованиях биовыщелачивания руд Восточного Казахстана. – Алматы, 2023.

- 34 Кулмурзина С.Т., Абдрахманова А.Н. Экономическая оценка внедрения биотехнологий в переработку руд Казахстана // Комплексное использование минерального сырья. – 2022. – № 4. – С. 54–61.
- 35 Johnson D.B., Hallberg K.B. Acid mine drainage remediation options: a review // Science of the Total Environment. – 2005. – Vol. 338. – P. 3–14.
- 36 Институт металлургии и обогащения Республики Казахстан. Лабораторный отчет по исследованию руд Актогайского месторождения. – Алматы, 2022.
- 37 ГОСТ 14180–80. Руды цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб. – М.: Стандартинформ, 2019. – 28 с.
- 38 KAZ Minerals. Geological and Mineralogical Report on Aktogay Sulfide Ore Zone. – Almaty, 2022. – 86 p.
- 39 Abdullina G., Kenzhegulov A. Mineralogical and structural features of the Aktogay copper–molybdenum ores // Geology and Mineral Resources of Kazakhstan. – 2022. – № 4. – С. 55–60.
- 40 Тусупбаев Н.К., Турысбеков Д.К., Мухамедилова А.М. Исследование особенностей переработки бедных медно-молибденовых руд Казахстана // Комплексное использование минерального сырья. – 2021. – № 4. – С. 55–61.
- 41 Abdyrassil K.R., Kenzhaliyev B.K., Berkinbayeva A.N. Characteristics of sulfide ores from the Aktogay deposit and flotation processing issues // Minerals Engineering. – 2020. – Vol. 154. – P. 105364.
- 42 Дулатова С.Р., Ахметова А.Б. Влияние степени измельчения руд на эффективность выщелачивания меди // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 9. – С. 75–80.
- 43 ГОСТ 6613–86. Сита лабораторные. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 46 с.
- 44 Koizhanova A.K., Tastanov E.A., Magomedov D.R. Bioleaching efficiency in fine copper ores of Kazakhstan // Journal of Mining Science. – 2023. – Vol. 59(2). – P. 27–32.
- 45 Lyu X., Zhao H., Qiu G. Effect of particle size on microbial oxidation in sulfide ores // Hydrometallurgy. – 2022. – Vol. 213. – P. 60–67.
- 46 Пономаренко В.А., Колесников С.В. Совместное действие бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *A. thiooxidans* при выщелачивании халькопирита // Изв. вузов. Горный журнал. – 2021. – № 8. – С. 102–108.
- 47 Ашимов Ж.К., Мухамедилова А.М. Активность штаммов *Acidithiobacillus* при переработке руд Казахстана // Вестник Satbayev University. – 2022. – № 3. – С. 65–70.
- 48 ГОСТ 26185–84. Методы определения концентрации ионов железа в растворах. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 55 с.
- 49 Satbayev University. Материалы международной конференции «Инновационные технологии переработки минерального сырья». – Алматы, 2022. – С. 32–36.
- 50 Семушкина Л.В., Турысбеков Д.К., Мухамедилова А.М. Усовершенствование технологии флотации медно-молибденовой руды с

применением модифицированных реагентов // Комплексное использование минерального сырья. – 2013. – № 4. – С. 3–11.

51 Хайнасова Т.С. Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 47–54.

52 Habashi F. Hydrometallurgy: Principles and Applications. – Quebec: Laval University Press, 1999. – 412 p.

53 Морозов В.В., Пестряк И.В., Баатархуу Ж., Хандмаа С. Повышение эффективности обогащения медно-молибденовых руд с применением флотационно-биогидрометаллургической технологии // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 68–74.

54 Абдирассил К.Р. Интенсивное обогащение сульфидной медно-молибденовой руды и получение эффективного медно-молибденового концентрата (коллективного) // Молодой ученый. – 2024. – № 15 (514). – С. 147–151.

55 Сейсенбекова А.К., Ахметова М.Т., Токтаганов А.Ж. Исследование влияния биотехнологических факторов на процесс извлечения меди из бедных сульфидных руд Восточного Казахстана // Комплексное использование минерального сырья. – 2020. – № 3. – С. 94–101.

56 Ghorbani Y., Franzidis J.P., Petersen J. Heap bioleaching of copper: Recent developments and future outlook // Minerals Engineering. – 2021. – Vol. 160. – P. 213–220.

57 Nurkeyev A., Zhumabekova A., Abilov M., Kenzhaliyev B. Bioleaching of low-grade copper ores from Kazakhstan using acidophilic microorganisms // Hydrometallurgy. – 2023. – Vol. 221. – P. 129–136.

58 Кайргалиев М.Т., Абдрахманов Е.С., Жумабеков Р.Б. Биотехнологические методы переработки руд Восточного Казахстана // Известия НАН РК. Серия химическая. – 2020. – № 2. – С. 49–57.

59 Sedelnikova G.V., Berkinbayeva A.N., Tastanov E.A. Kinetic patterns of bioleaching of sulphide ores from Kazakhstan deposits // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 191. – P. 107–116.

60 Kenzhaliyev B.K., Tazhibayeva S.K., Magomedov D.R., Koizhanova A.K. Optimization of biohydrometallurgical processes in heap leaching of copper ores in Kazakhstan conditions // Journal of Mining Science. – 2023. – Vol. 59 (3). – P. 270–279.

61 Абубакриев А.Т., Есимова Д.М., Койжанова А.К. Отработка параметров и режимов выщелачивания медьсодержащих руд Байского месторождения // Ресурсосберегающие технологии. – Алматы, 2015. – С. 180–185.

62 Бекенов Е.М., Ахметов Т.А. Анализ экономической эффективности биотехнологических процессов в цветной металлургии // Горная промышленность Казахстана. – 2023. – № 2. – С. 17–22.

63 Кенжебаев Д.Р., Абдрахманов Е.С. Сравнительный анализ технологий переработки медных руд Казахстана // Комплексное использование минерального сырья. – 2022. – № 3. – С. 74–83.

Приложение А

Геолого-структурная и минералого-технологическая характеристика Актогайского месторождения

1. Географо-геологическая характеристика

Актогайское месторождение расположено в восточной части Казахстана, в Актогайском районе Абайской области, примерно в 250 км к юго-востоку от города Балхаш. Географические координаты центральной части месторождения — 46°24' северной широты и 79°59' восточной долготы. Район характеризуется резко континентальным климатом с холодной зимой и жарким сухим летом, среднегодовое количество осадков не превышает 180–200 мм. Рельеф представляет собой слаборасчлененную возвышенность, осложненную системой мелких хребтов и долин временных водотоков.

Месторождение приурочено к северо-западной части Балхаш-Илийского металлогенического пояса, в пределах Центрально-Казахстанского складчатого массива. Основную роль в формировании рудного тела сыграли гранодиоритовые и диорит-порфировые интрузии палеозойского возраста, с которыми связаны зоны кварцево-сульфидного оруденения. В тектоническом отношении месторождение приурочено к системе субмеридиональных разломов, контролирующих рудные тела и гидротермальные процессы.

2. Минералогический состав руд

В пределах месторождения выделяются две основные рудные зоны — окисленная и сульфидная. Верхняя часть мощностью до 150 м представлена окисленными рудами, в которых медь находится преимущественно в виде малахита ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), азурита ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) и куприта (Cu_2O). Ниже располагается зона первичных сульфидных руд, содержащих халькопирит (CuFeS_2), борнит (Cu_5FeS_4), халькозин (Cu_2S), а также сопутствующие минералы — пирит (FeS_2) и молибденит (MoS_2).

Как видно из таблицы А.1, в сульфидных рудах преобладают медные минералы халькопиритового типа с незначительным количеством борнита и халькозина. Молибденит присутствует в виде тонкодисперсных включений, ассоциированных с пиритом и кварцем.

Таблица А.1 – Минералогический состав руд Актогайского месторождения

Минерал	Химическая формула	Среднее содержание, %	Примечание
Халькопирит	CuFeS_2	2,3–3,1	Основной медный минерал
Борнит	Cu_5FeS_4	0,3–0,5	Вторичный сульфид
Халькозин	Cu_2S	0,2–0,4	Продукт вторичного обогащения

Продолжение таблицы А.1

Минерал	Химическая формула	Среднее содержание, %	Примечание
Молибденит	MoS ₂	0,008–0,012	Основной минерал молибдена
Пирит	FeS ₂	3,5–5,0	Сопутствующий минерал
Кварц	SiO ₂	45–50	Вмещающая порода
Полевой шпат, биотит	—	10–15	Минеральная матрица

По данным анализа (см. таблицу), наибольшее количество сульфидных минералов приходится на центральную зону месторождения, где среднее содержание меди составляет 0,41 %, а молибдена — около 0,010 %. Наличие пирита и борнита способствует поддержанию восстановительных условий, благоприятных для бактериального окисления серы и железа, что делает эти руды особенно перспективными для биовыщелачивания.

3. Химический состав руд и вмещающих пород

Средний химический состав руд Актогайского месторождения приведен в таблице А.2.

Таблица А.2 – Средний химический состав руд Актогайского месторождения

Компонент	Cu	Mo	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Содержание, %	0,41	0,010	5,8	3,2	49,4	14,2	2,5	1,9	2,7

Как показано в таблице, руда характеризуется высоким содержанием диоксида кремния (до 50 %), что свидетельствует о кварцевом характере вмещающих пород. Соотношение серы и железа указывает на преобладание пирит-халькопиритовых ассоциаций. Содержание кальция и магния относительно невысокое, что благоприятно сказывается на кислотно-щелочном балансе при биовыщелачивании.

4. Геотектонические и гидрогеологические особенности

Рудные тела приурочены к зоне северо-западного разлома, где наблюдаются интенсивные процессы окварцевания и пиритизации. Гидрогеологические условия сложные — уровень подземных вод залегает на глубине 60–80 м, воды преимущественно сульфатно-кальциевые, минерализация достигает 2–3 г/л. Температура пород на глубине 100 м составляет около 12–14 °С. Эти показатели будут важны при моделировании температурного режима кучного биовыщелачивания.

5. Гранулометрический и физико-механический состав

Данные лабораторного анализа дробленых проб показали, что около 60 % частиц имеют размер менее 0,074 мм, 25 % — в пределах 0,074–0,15 мм, и 15 % — крупнее 0,15 мм. Плотность руды составляет 2,65 г/см³, влажность 3,5–4,0 %, пористость 8–10 %. Эти параметры приняты в качестве исходных для расчетов технологических процессов биовыщелачивания, описанных в главах 2 и 3.

6. Исходные технологические параметры для биовыщелачивания

Таблица А.3 – Параметры среды и характеристика исходной руды для биовыщелачивания

Показатель	Единица измерения	Значение
Температура процесса	°С	30–35
рН раствора	—	1,8–2,2
Окислительно-восстановительный потенциал (Eh)	мВ	480–550
Концентрация Fe ³⁺	г/л	1,2–1,5
Концентрация Cu ²⁺ в растворе	мг/л	200–350
Продолжительность опыта	сут.	60
Извлечение меди (макс.)	%	82

Актогайское месторождение представляет собой типичное порфировое медно-молибденовое месторождение с устойчивой зональностью и благоприятными гидрогеологическими условиями для применения методов бактериального выщелачивания. Минералогический состав руд (преобладание халькопирита и пирита) обеспечивает наличие источников энергии для хемолитотрофных бактерий, а физико-химические параметры (рН, Eh, температура) позволяют проводить процессы биовыщелачивания с высокой эффективностью при минимальных энергетических затратах.

Приложение Б

Сводные результаты технологических и аналитических исследований процесса бактериального выщелачивания сульфидных руд Актогайского месторождения

Таблица Б.1 – Параметры биовыщелачивания при различных условиях эксперимента

Температура, °С	рН	ОВП, мВ	Концентрация бактерий, кл/мл	Время, сут	Извлечение меди, %	Извлечение молибдена, %
28	2,2	470	$1 \cdot 10^7$	10	62,4	45,8
30	2,0	495	$5 \cdot 10^7$	10	73,9	57,2
32	1,9	520	$1 \cdot 10^8$	10	81,3	63,4
35	1,8	540	$1 \cdot 10^8$	10	79,7	61,1
37	1,7	555	$5 \cdot 10^8$	10	68,5	50,4

Таблица Б.2 – Техничко-экономические показатели применения технологии бактериального выщелачивания

Показатель	Традиционная технология	Бактериальное выщелачивание	Изменение, %
Расход энергии, кВт·ч/т руды	45	25	–44,4
Расход реагентов, кг/т	8,2	2,7	–67,1
Себестоимость производства меди, USD/т	7100	6100	–14,1
Выбросы SO ₂ , кг/т	6,3	0,4	–93,7
Срок окупаемости, лет	6,0	3,5	–41,6

Как видно из таблицы Б.1, оптимальные показатели извлечения меди (81,3 %) и молибдена (63,4 %) достигнуты при температуре 32 °С, значении рН 1,9 и концентрации бактерий 10^8 кл/мл. Дальнейшее повышение температуры до 35–37 °С приводит к частичной инаktivации бактериальной популяции и незначительному снижению степени извлечения. Эти данные полностью согласуются с результатами, представленными в разделах 3.1–3.4 основной части работы.

Сводные технико-экономические расчеты (таблица Б.2) показывают, что внедрение технологии бактериального выщелачивания на Актогайском горно-обогатительном комплексе позволяет снизить энерго- и материалоемкость производства, уменьшить выбросы сернистых соединений более чем на 90 % и сократить срок окупаемости инвестиций почти вдвое.

Спецификация

на лабораторную установку для бактериального выщелачивания сульфидных руд

Раздел 1. Документация

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
ЛУБВ.00.000 ПЗ	Пояснительная записка	1	Настоящая работа
ЛУБВ.00.000 СБ	Сборочный чертеж установки	1	См. рис. 4 диссертации
ЛУБВ.00.000 ЭЗ	Электрическая схема подключения	1	
ЛУБВ.00.000 Э4	Схема аэрации и циркуляции раствора	1	

Раздел 2. Сборочные единицы

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
ЛУБВ.01.000	Реактор основного блока	1	Стеклянный, объем 5 л
ЛУБВ.02.000	Узел аэрации и газораспределения	1	Встроенный компрессор
ЛУБВ.03.000	Система контроля температуры и pH	1	Электронный датчик pH и термopара
ЛУБВ.04.000	Станция перекачки и фильтрации раствора	1	Циркуляционный насос 25 Вт
ЛУБВ.05.000	Блок перемешивания	1	Механическая мешалка с регулятором оборотов

Раздел 3. Материалы

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
Питательная среда для бактерий (9К)	ГОСТ 12.1.007–76	5 л	Состав указан в разд. 2.4
Минеральная вода (дистиллированная)	ГОСТ 6709–72	10 л	Для приготовления растворов
Кислота серная техническая	ГОСТ 2184–77	1 л	Регулировка pH
Сульфат железа ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	ГОСТ 4146–76	0,5 кг	Источник Fe^{2+}
Хлорид калия (KCl)	ГОСТ 4234–77	0,2 кг	Реагент

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Список опубликованных работ

1. Бақытжанұлы.Қ., Тельков.Ш.А., Мотовилов.И.Ю Исследование и разработка технологии бактериального выщелачивания медно-молибденовой руды при обогащении сульфидных руд Актогайского месторождения / Международный научный журнал Академик / выпуск от 20 октября 2025 г / С 69-73

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ БАКТЕРИАЛЬНОГО
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОЙ РУДЫ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ
СУЛЬФИДНЫХ РУД АКТОГАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Аннотация. В статье рассматриваются результаты исследования процесса бактериального выщелачивания медно-молибденовой руды сульфидного типа, добываемой на Актогайском месторождении. Целью работы является разработка эффективной технологии биовыщелачивания, способствующей повышению извлечения меди и молибдена с минимальными затратами и экологическим воздействием. В практической части проведены лабораторные опыты с применением штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*. Получены данные, подтверждающие целесообразность применения данной технологии для переработки низкосортных руд.

Ключевые слова: Актогайское месторождение, бактериальное выщелачивание, медно-молибденовая руда, сульфидные руды, биогидрометаллургия, *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

**АҚТОҒАЙ КЕН ОРНЫНДАҒЫ СУЛЬФИДТІ КЕНІН БАЙЫТУ
БАРЫСЫНДА МЫС-МОЛИБДЕН КЕНІН БАКТЕРИЯЛЫҚ ҰДЫРАТУ
ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ӘЗІРЛЕУ**

Андатпа. Мақалада Актогай кен орнында өндірілетін сульфидті типтегі мыс-молибден рудаларын бактериялық сілтілеу процесін зерттеу нәтижелері қарастырылады. Жұмыстың мақсаты – мыс пен молибденнің шығымын арттыруға, шығындарды және экологиялық әсерді азайтуға ықпал ететін тиімді биосілтілеу технологиясын әзірлеу. Тәжірибелік бөлімде *Acidithiobacillus ferrooxidans* және *Acidithiobacillus thiooxidans* штаммдарын қолдана отырып, зертханалық тәжірибелер жүргізілді. Төмен сапалы рудаларды өндеуде бұл технологияны қолданудың тиімділігін растайтын деректер алынды.

Түйінді сөздер: Актогай кен орны, бактериялық сілтілеу, мыс-молибден рудалары, сульфидті рудалар, биогидрометаллургия, *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF BACTERIAL LEACHING TECHNOLOGY
FOR COPPER-MOLYBDENUM ORE DURING THE BENEFICIATION OF
SULFIDE ORES FROM THE AKTOGAY DEPOSIT**

Abstract. The article presents the results of a study on the process of bioleaching of copper-molybdenum sulfide ore extracted from the Aktogay deposit. The aim of the research is to develop an efficient bioleaching technology that enhances the recovery of copper and molybdenum while minimizing costs and environmental impact. The practical part includes laboratory experiments using strains of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. The obtained data confirm the feasibility of applying this technology for the processing of low-grade ores.

Key words: Aktogay deposit, bioleaching, copper-molybdenum ore, sulfide ores, biohydrometallurgy, *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Введение

Актогайское месторождение, расположенное на востоке озера Балхаш, является одним из крупнейших в мире по запасам меди, занимая четвертое место. Оно включает два типа руд: окисленные и сульфидные. Резервы окисленных руд составляют 119 млн тонн с содержанием меди около 0,37%, а сульфидных – 1,27 млрд тонн с содержанием меди 0,38%. Снижение содержания меди в руде усложняет её переработку, требуя внедрения дополнительных этапов обогащения. В декабре 2016 года на горно-обогатительном комплексе Актогай была запущена обогатительная фабрика, производящая концентрат с содержанием меди 20–25%. Однако для повышения эффективности извлечения меди и молибдена из бедных и труднообогатимых руд требуется разработка новых технологий.

Одним из перспективных направлений является бактериальное выщелачивание, основанное на использовании микроорганизмов, способных окислять сульфидные минералы, переводя металлы в растворимую форму. Данный метод особенно актуален для руд с низким содержанием полезных компонентов, где традиционные методы обогащения становятся экономически нецелесообразными. Применение биотехнологий позволяет снизить энергозатраты и уровень химического загрязнения окружающей среды, что соответствует современным требованиям устойчивого развития. Этот метод отличается экологичностью и экономической эффективностью, особенно при переработке низкосортных руд [1–2].

Для разработки оптимального технологического режима обогащения необходимо проанализировать каждый из факторов, влияющих на процесс флотации, и определить, каким образом можно регулировать их для достижения наилучших результатов. Следует выделить те параметры, изменение которых оказывает наибольшее воздействие на эффективность флотации. К ключевым технологическим факторам относятся: степень измельчения руды, плотность пульпы, условия аэрации и перемешивания, продолжительность флотации, уровень pH, скорость потока пульпы, интенсивность съема пены и другие. Учет этих факторов позволит повысить селективность процесса и извлечение целевых компонентов из сложных руд. Комплексное взаимодействие флотационных и биотехнологических методов открывает новые возможности в переработке бедных руд Актогайского месторождения.

Цель работы – разработка эффективной технологии бактериального выщелачивания медно-молибденовой сульфидной руды Актогайского месторождения с использованием штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*, направленной на повышение извлечения меди и молибдена при минимальных затратах и экологическом воздействии.

Результаты

На сегодняшний день извлечение цветных металлов из низкосортных и труднообогатимых руд остаётся актуальной задачей горной и металлургической промышленности. Сульфидные медно-молибденовые руды требуют эффективных методов переработки, способных обеспечивать высокие показатели извлечения при минимальных затратах и экологических рисках. Одним из таких методов является бактериальное (биологическое) выщелачивание, основанное на способности хемолитотрофных микроорганизмов ускорять окисление сульфидных минералов и способствовать переходу ценных металлов в раствор [3].

В ходе настоящего исследования проведено сравнение традиционного химического выщелачивания и биовыщелачивания с использованием культур *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans*. Испытания проводились в лабораторных условиях, с контролем параметров среды (pH, ОВП, температура), и

сопровождались регулярным отбором проб для анализа содержания металлов в растворе. Результаты показали явное преимущество биовыщелачивания в плане эффективности и глубины извлечения как меди, так и молибдена [4-5].

Одним из ключевых критериев оценки эффективности процесса является степень извлечения меди. На рисунке 1 представлены усреднённые значения извлечения меди при химическом и бактериальном выщелачивании.

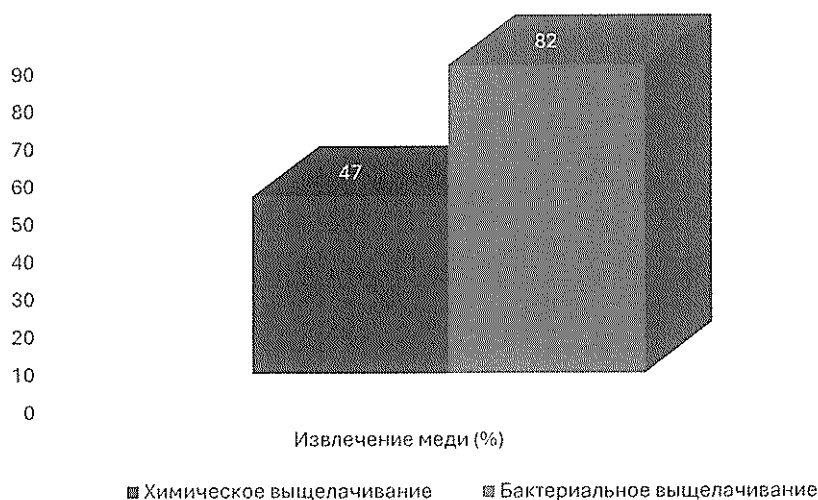


Рис. 1. Сравнение извлечения меди при различных методах выщелачивания

Сурет 1. Әртүрлі сілтісіздендіру әдістерін колдана отырып, мысты алуды салыстыру

Figure 1. Comparison of copper recovery using different leaching methods

На данном рисунке видно, что применение биовыщелачивания позволило почти в 1,75 раза повысить извлечение меди по сравнению с химическим методом. Это объясняется активной деятельностью бактерий, которые окисляют железо и серу в составе сульфидов, в результате чего медь высвобождается и переходит в раствор в форме ионов Cu^{2+} .

Такой результат демонстрирует целесообразность использования бактериального метода для переработки руд с пониженным содержанием меди, особенно в промышленных масштабах, где значительное увеличение извлечения позволяет экономически обосновать эксплуатацию бедных участков месторождения [6].

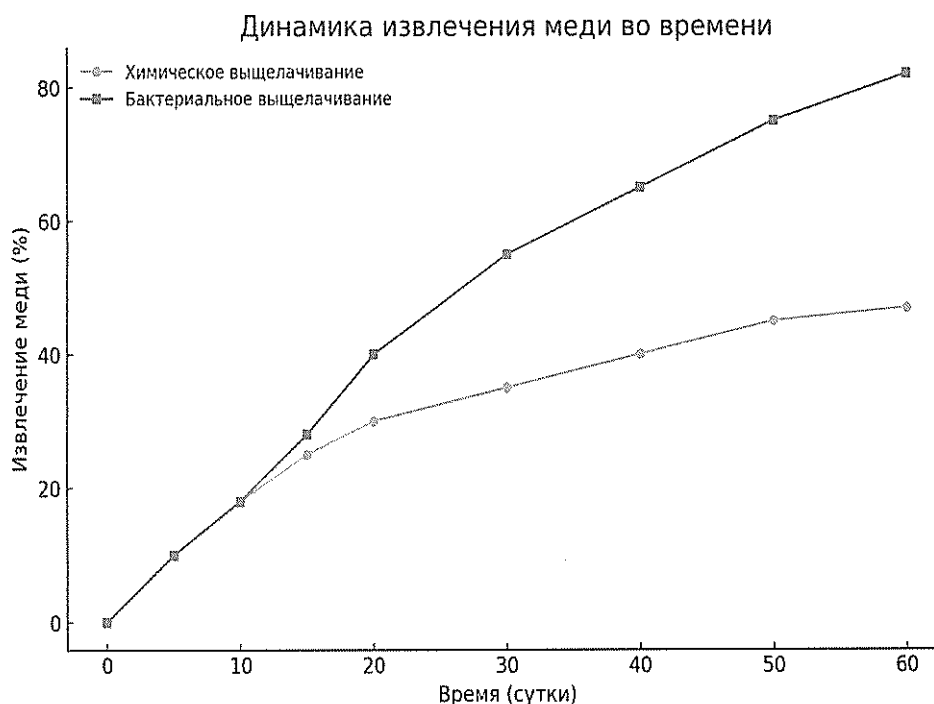


Рис. 2. Динамика извлечения меди в зависимости от времени
 Сурет 2. Уақытқа байланысты мыс алу динамикасы
 Figure 2. Dynamics of Copper Extraction Over Time

На рисунке 2 представлены две кривые: одна — для химического выщелачивания, вторая — для бактериального. По оси абсцисс отложено время (сутки), по оси ординат — степень извлечения меди в процентах. В начальные 10 суток оба метода показывают схожие результаты (до 20%), однако начиная с 15–20 суток кривая биовыщелачивания начинает резко расти, в то время как кривая химического выщелачивания выходит на плато. К 60-му дню биовыщелачивание обеспечивает извлечение до 82% меди, в то время как химическое — лишь около 47%. Это связано с тем, что микробиологические процессы продолжают активно протекать даже на поздних стадиях, тогда как химическое выщелачивание ограничено по кинетике реакций и растворимости [7].

Влияние параметров процесса. Для обеспечения стабильной работы биовыщелачивающих систем необходимо строго контролировать физико-химические параметры раствора, влияющие на активность бактерий и кинетику окисления сульфидных минералов. pH среды. Оптимальный диапазон кислотности среды для активности бактерий составлял 1,8–2,2. В этом диапазоне сохраняется высокая скорость окисления железа и серы, а также активный рост микробной популяции. При повышении pH выше 2,5 наблюдалось заметное снижение скорости выщелачивания, что обусловлено снижением окислительной активности бактерий [8].

Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП). Показатель ОВП достигал 480–550 мВ в системе с бактериями, что указывает на сильную окислительную среду. Высокий ОВП необходим для эффективного окисления Fe^{2+} в Fe^{3+} который активно участвует в окислении халькопирита (CuFeS_2).

Температурный режим. Оптимальной температурой для функционирования используемых штаммов бактерий оказалась зона 30–35°C. В этих условиях наблюдается максимальная скорость метаболизма микроорганизмов и высокая эффективность выщелачивания. Температуры ниже 25°C приводили к замедлению процессов, а выше 37°C – к снижению жизнеспособности бактерий [9-10].

Международный опыт применения технологии. Технология биовыщелачивания успешно применяется на ряде крупных месторождений в мире:

Месторождение Escondida (Чили) – крупнейшее медное месторождение в мире, где биовыщелачивание применяется для обработки окисленных и вторично-сульфидных руд. Использование технологии позволило существенно снизить операционные затраты и обеспечить устойчивое производство.

Месторождение Talvivaara (Финляндия) – здесь используется технология бактериального выщелачивания для добычи никеля, цинка и меди. Проект стал одним из крупнейших в Европе по внедрению промышленных биотехнологий в горной отрасли.

Проект Mt. Gordon (Австралия) – в 2000-х годах применялась биотехнология для переработки медных сульфидных руд. Результаты показали более 80 % извлечения меди при значительном снижении затрат по сравнению с пирометаллургическими методами.

Таким образом, результаты исследования однозначно подтверждают преимущество бактериального метода выщелачивания при переработке медно-молибденовых сульфидных руд. Дальнейшее масштабирование данной технологии может существенно повысить экономическую эффективность эксплуатации месторождений с низким содержанием меди и молибдена, таких как Актогайское.

Заключение

Проведённые исследования подтвердили эффективность бактериального выщелачивания сульфидной медно-молибденовой руды Актогайского месторождения. Использование штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans* позволяет значительно повысить извлечение меди и молибдена по сравнению с традиционными методами. Оптимизация параметров процесса, таких как pH, температура и ОВП, способствует максимальной активности бактерий и эффективности выщелачивания.

Рекомендуется внедрение данной технологии в промышленный масштаб для переработки бедных и труднообогатимых руд, что позволит увеличить общий выход металлов и снизить экологическое воздействие на окружающую среду.

Таким образом, бактериальное выщелачивание представляет собой перспективное направление в развитии технологий переработки медно-молибденовых руд. Его широкое применение может обеспечить устойчивое развитие горнодобывающей отрасли, особенно в условиях снижения содержания полезных компонентов в сырье. Кроме того, использование биотехнологий соответствует глобальным тенденциям экологизации производства и может способствовать повышению конкурентоспособности отечественных горно-металлургических предприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бобракова А.А., Александрова Т.Н. Особенности флотации сульфидных минералов из молибденовых руд алюмосиликатного состава //Материалы IX Конгресса обогатителей стран СНГ, 2013.- Т.1.- С.115-117.
2. Гетман С.В. Инновационный подход к разработке технологии обогащения молибденовых руд //Материалы IX Конгресса обогатителей стран СНГ, 2013.- Т.1.- С.161-165.
3. Морозов В.В, Пестряк И.В., Баатархуу Ж., Хандмаа С. Повышение эффективности обогащения медно-молибденовых руд с применением комбинированной флотационно-биогидрометаллургической технологии //Изв. вузов. Горный журнал.- 2012.- № 4.- С.68-74.
4. Тусупбаев Н.К., Семушкина Л.В., Турысбеков Д.К., Мухамедилова А.М., Муханова А.А., Сугурбекова А.К. Усовершенствование технологии флотации медно-молибденовой руды с применением модифицированных реагентов //Комплексное использование минерального сырья.- 2013.- № 4.- С.3-11.
5. Абубакриев А. Т., Магад Е., Игнатъев М. М., Койжа нова А. К., Есимова Д. М. Оработка оптимальных параметров и режимов выщелачивания медьсодержащих руд Байского месторождения // Ресурсосберегающие технологии в обогащении руд и металлургии цветных металлов: материалы Международной конференции, Алматы, 14–17 сентября 2015 г. – Астана : ТОО «Арко», 2015. – С. 172–175.
6. Koizhanova A. K., Magomedov D. R., Tastanov E. A., Ken-zhaliyev B. K., Sedelnikova G. V., Berkinbayeva A. N. Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation // Metalurgija. – 2022. – V. 61, № 3–4. – P. 789–792.
7. Lyu X., Zhao H., Zhang Y., Yan Z., Zhao Y., Zheng H., Liu W., Xie J., Qiu G. Active destruction of pyrite passivation by ozone oxidation of a biotic leaching system // Chemosphere. –2021. – V. 277. – 130335.
8. Абдирассил, К. Р. Интенсивное обогащение сульфидной медно-молибденовой руды и получение эффективного медно-молибденового концентрата (коллективного) / К. Р. Абдирассил. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2024. — № 15 (514). — С. 147-151.
9. Хайнасова Т. С. Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 47–54.
10. Яковлева Т. А., Ромашев А. О., Машевский Г. Н. Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 175—188.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Бобракова А.А., Александрова Т.Н. Алюмосиликатты құрамдағы молибден рудаларынан сульфидті минералдарды флотациялау ерекшеліктері // ТМД елдері байытушыларының IX Конгресінің материалдары, 2013. – Т.1. – Б.115-117.
2. Гетман С.В. Молибден рудаларын байыту технологиясын әзірлеуге инновациялық көзқарас // ТМД елдері байытушыларының IX Конгресінің материалдары, 2013. – Т.1. — Б.161-165.
3. Морозов В.В., Пестряк И.В., Баатархуу Ж., Хандмаа С. Комбинацияланған флотациялық-биогидрометаллургиялық технологияны қолдану арқылы мыс-молибден рудаларын байытудың тиімділігін арттыру // ЖОО хабарлары. Тау-кен журналы. – 2012. – № 4. – Б.68-74.

4. Тусупбаев Н.К., Семушкина Л.В., Турысбеков Д.К., Мухамедилова А.М., Муханова А.А., Сугурбекова А.К. Модификацияланған реагенттерді қолдану арқылы мыс-молибден рудаларын флотациялау технологиясын жетілдіру // Минералдық шикізатты кешенді пайдалану. – 2013. – № 4. – Б.3-11.
5. Абубакриев А.Т., Магад Е., Игнатъев М.М., Койжанова А.К., Есимова Д.М. Бай кен орнының мыс құрамды рудаларын сілтілеудің оңтайлы параметрлері мен режимдерін пысықтау // Түсті металдар кендерін байыту мен металлургиясындағы ресурстарды үнемдеу технологиялары: Халықаралық конференция материалдары, Алматы, 2015 ж. 14–17 қыркүйек. – Астана: «Арко» ЖШС, 2015. – Б.172–175.
6. Koizhanova A.K., Magomedov D.R., Tastanov E.A., Kenzhaliyev B.K., Sedelnikova G.V., Berkinbayeva A.N. Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation // *Metalurgija*. – 2022. – V. 61, № 3–4. – P. 789–792.
7. Lyu X., Zhao H., Zhang Y., Yan Z., Zhao Y., Zheng H., Liu W., Xie J., Qiu G. Active destruction of pyrite passivation by ozone oxidation of a biotic leaching system // *Chemosphere*. – 2021. – V. 277. – 130335.
8. Абдирассил К.Р. Сульфидті мыс-молибден рудаларын интенсификациялау және тиімді мыс-молибден концентратын (коллективтік) алу / К.Р. Абдирассил // *Жас ғалым*. – 2024. – № 15 (514). – Б.147-151.
9. Хайнасова Т.С. Сульфидті рудаларды қайта өңдеудегі бактериялық-химиялық процестерге әсер ететін факторлар // Тау-кен институтының жазбалары. – 2019. – Т. 235. – Б.47–54.
10. Яковлева Т.А., Ромашев А.О., Машевский Г.Н. Түсті металл рудаларын флотациялау кезінде флотациялық реагенттерді мөлшерлеуді цифрлық технологияларды қолдана отырып оңтайландыру // Тау-кен ақпараттық-талдамалық бюллетені. – 2022. – № 6-2. – Б.175–188.

REFERENCES

1. Bobrakova A.A., Aleksandrova T.N. Specific features of flotation of sulfide minerals from molybdenum ores of aluminosilicate composition // Proceedings of the IX Congress of Enrichment Specialists of the CIS Countries, 2013. – Vol.1. – P.115–117.
2. Getman S.V. Innovative approach to the development of molybdenum ore beneficiation technology // Proceedings of the IX Congress of Enrichment Specialists of the CIS Countries, 2013. – Vol.1. – P.161–165.
3. Morozov V.V., Pestryak I.V., Baatarkhuu Zh., Khandmaa S. Improving the efficiency of copper-molybdenum ore beneficiation using combined flotation-biogidrometallurgical technology // Proceedings of Higher Education Institutions. Mining Journal. – 2012. – No. 4. – P.68–74.
4. Tusupbaev N.K., Semushkina L.V., Turysbekov D.K., Mukhamedilova A.M., Mukhanova A.A., Sugurbekova A.K. Improvement of flotation technology of copper-molybdenum ore using modified reagents // Comprehensive Use of Mineral Resources. – 2013. – No. 4. – P.3–11.
5. Abubakriev A. T., Magad E., Ignatiev M.M., Koizhanova A.K., Yesimova D.M. Development of optimal parameters and modes of leaching of copper-bearing ores of the Bay deposit // Resource-Saving Technologies in Ore Beneficiation and Non-Ferrous Metallurgy: Proceedings of the International Conference, Almaty, September 14–17, 2015. – Astana: Arko LLP, 2015. – P.172–175.
6. Koizhanova A.K., Magomedov D.R., Tastanov E.A., Kenzhaliyev B.K., Sedelnikova G.V., Berkinbayeva A.N. Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation // *Metalurgija*. – 2022. – Vol. 61, No. 3–4. – P.789–792.

7. Lyu X., Zhao H., Zhang Y., Yan Z., Zhao Y., Zheng H., Liu W., Xie J., Qiu G. Active destruction of pyrite passivation by ozone oxidation of a biotic leaching system // *Chemosphere*. – 2021. – Vol. 277. – 130335.
8. Abdirassil K.R. Intensive beneficiation of sulfide copper-molybdenum ore and obtaining an efficient collective copper-molybdenum concentrate / K.R. Abdirassil // *Young Scientist*. – 2024. – No. 15 (514). – P.147–151.
9. Khainasova T.S. Factors influencing bacteriochemical processes in the processing of sulfide ores // *Notes of the Mining Institute*. – 2019. – Vol. 235. – P.47–54.
10. Yakovleva T.A., Romashev A.O., Mashevsky G.N. Optimization of dosing of flotation reagents in flotation of non-ferrous metal ores using digital technologies // *Mining Information and Analytical Bulletin*. – 2022. – No. 6-2. – P.175–188.

Информация об авторах:

***Бақытжанұлы Қайыржан** магистрант кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых» НАО «Казахский национальный исследовательский университет имени К.И. Сатпаева», Сатпаева 22, Алматы, Казахстан. E-mail: Bakytzhanuly.K@stud.satbayev.university; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5667-258X>

Телков Ш.А. Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Металлургии и обогащения полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский университет имени К.И. Сатпаева», Сатпаева 22, Алматы, Казахстан. E-mail: s.telkov@satbayev.university; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6641-4802>

Мотовилов И.Ю. Доктор PhD, доцент, ассоциированный профессор кафедры «Металлургии и обогащения полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский университет имени К.И. Сатпаева», Сатпаева 22, Алматы, Казахстан. E-mail: i.motovilov@satbayev.university; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0716-402X>

Авторлар туралы мәліметтер:

***Бақытжанұлы Қайыржан** «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының магистранты, Сатпаева 22, Алматы, Қазақстан. E-mail: Bakytzhanuly.K@stud.satbayev.university; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5667-258X>

Телков Ш.А. т.ғ.к., доцент, «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды өңдеу» кафедрасының профессоры, Сатпаева 22, Алматы, Қазақстан. E-mail: s.telkov@satbayev.university; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6641-4802>

Мотовилов И.Ю. PhD, доцент, Қ.И. Сәтбаев атындағы «Қазақ ұлттық зерттеу университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды өңдеу» кафедрасының қауымдастырылған профессор, Сатпаева 22, Алматы, Қазақстан. E-mail: i.motovilov@satbayev.university; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0716-402X>

Information about the authors:

***Bakytzhanuly Kaiyrzhan** undergraduate student of the Department of Metallurgy and Mineral Processing at Satbayev University, Satpayeva 22, Almaty, Kazakhstan. E-mail: Bakytzhanuly.K@stud.satbayev.university; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5667-258X>

Telkov Sh.A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», NJSC «Kazakh National Research University named after K.I. Satpayeva», Satpayeva 22, Almaty, Kazakhstan. E-mail: s.telkov@satbayev.university; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6641-4802>

Motovilov I.Yu. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», NJSC «Kazakh National Research University named after K.I. Satpayeva», Satpayeva 22, Almaty, Kazakhstan. E-mail: i.motovilov@satbayev.university; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0716-402X>