

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»

Базар Ерасыл Нұрабдуллаұлы

«Отработка технологии наработки флотационного концентрата на полупромышленной  
установке из первичной руды месторождения «Пустынное»»

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

ОП 7М07226 – «Обогащение полезных ископаемых»

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

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

Институт Горно-металлургический имени О. А. Байконурова

УДК 622.75/77.762.765

На правах рукописи

Базар Ерасыл Нұрабдуллаұлы

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	«Отработка технологии наработки флотационного концентрата на полупромышленной установке из первичный руды месторождения «Пустынное»»
Направление подготовки	7M07226 – Обогащение полезных ископаемых

Научный руководитель

Доктор PhD, ассоц. профессор  
 Мотовилов И.Ю.  
« 10 » 06 2024 г.

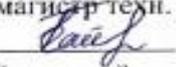
Рецензент  
Заместитель начальника производственно-технического отдела ГОК «Пустынное»,  
магистр техн. наук

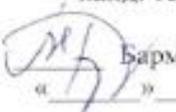


 Кучербаев Б.Р.  
2024 г.

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

Норм контроль

Ведущий инженер кафедры МиОПИ,  
магистр техн. наук  
 Таймасова А.Н.  
«    » 2024 г.

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующей кафедрой МиОПИ  
канд. техн. наук, ассоц.  
профессор  
 Барменшинова М.Б.  
«    » 2024 г.

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

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

Институт Горно-металлургический имени О. А. Байконурова

Кафедра «Металлургии и обогащения полезных ископаемых»

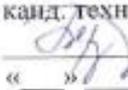
7M07226 – «Обогащение полезных ископаемых»

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой

МиОПИ,

канд. техн. наук, ассоц. профессор

 Барменшинова М.Б.

«     »     2024 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Базара Ерасыла Нұрабдуллаұлы

Тема: «Отработка технологии наработки флотационного концентрата на полупромышленной установке из первичной руды месторождения «Пустынное»»

Утверждена приказом Ректора Университета № 408-П/О от 23.11.2022.

Срок сдачи законченного проекта: «28» мая 2024 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Проба золотосульфидная руд от месторождение «Пустынное»

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Провести анализ литературных источников обогащения золотосодержащих руд;
- б) Изучить гранулометрический, химический, минералогический и фазовый состав золотосодержащей руды;
- в) Выполнить эксперименты по отработке режима гравитационного обогащения;
- г) Выполнить эксперименты по отработке режима флотационного обогащения;
- д) Выполнить эксперименты по отработке режима гидрометаллургическим методом;
- ж) Разработать технологическую схему переработки золотосодержащей руды месторождения «Пустынное» выполнить расчет баланса металла.

Перечень графического материала: демонстрационный материал с результатами исследований не менее чем на     слайдах.

Рекомендуемая основная литература:

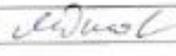
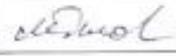
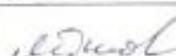
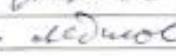
1. Котельников, И. В. Промышленная химия золота. Москва: ЛАНЬ, 2015. - 200 с.
2. Шафрановский, И. И. Технология и оборудование для переработки золотосодержащих руд. Москва: Недра-Бизнесцентр, 2018. - 180 с.
3. Кузнецов, В. И. Золотоносные россыпи: формирование, разведка, добыча. Москва: Горный мир, 2019. - 250 с.

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

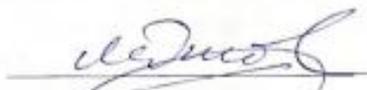
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Введение	20.10.2022	
Аналитический обзор литературы	25.11.2022	
Методика исследований	27.01 - 20.04.2023	
Экспериментальная часть	05.05.2023 - 15.07.2024	
Заключение	12.05 - 15.07.2024	

**Подписи**

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

Наименование разделов	Научный руководитель, консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Введение	И.Ю. Мотовилов Доктор PhD, ассоциированный профессор	25.05.2024	
Аналитический обзор литературы		25.05.2024	
Методика исследований		25.05.2024	
Экспериментальная часть		25.05.2024	
Заключение		25.05.2024	
Нормоконтролер	А. Н. Таймасова Ведущий инженер кафедры МиОПИ, магистр техн. наук	28.05.2024	

Научный руководитель


И.Ю. Мотовилов

Задание приняла к исполнению

Е.Н. Базар

Дата

«    »    2024 г.

## **АНДАТПА**

Осы магистрлік диссертацияның нәтижелері алтын кендерінің гравитациялық және флотациялық байытылуын анықтауға, сондай-ақ оларды байыту технологиясын жасауға бағытталған зерттеулерді ұсынады. Алтын бойынша пайдалы компоненттің бастапқы көрсеткіші 1,53 г/т.

Өртүрлі елдердегі құрамында алтыны бар материалдарды өңдеудің қолданыстағы технологияларын, әдеби талдауға келетін болсақ, магистрлік диссертация үшін осы тақырыпты таңдау негізді болды.

Зерттеу барысында бастапқы кеннің гранулометриялық сипаттамалары зерттелді, електен талдау жүргізілді, гравитациялық-флотациялық цианидтеу сынақтары жүргізілді. Алынған нәтижелер бойынша алтын кендерін байытудың технологиялық схемасы жасалды. Кейінгі гидрометаллургиялық өңдеуге жарамды флотациялық концентраттар да алынды.

## **АННОТАЦИЯ**

В данной магистерской диссертации представлены результаты исследований, направленных на определение гравитационной и флотационной обогатимости золотосодержащих руд, а также на разработку соответствующей технологии их обогащения. Исходное сырье характеризуется содержанием золота на уровне 1,53 г/т.

Основываясь на литературном анализе существующих технологий переработки золотосодержащего сырья в различных странах, выбор данной темы магистерской диссертации был обоснован.

В рамках исследования были изучены гранулометрические характеристики исходной руды, проведен ситовый анализ, а также выполнены тесты по гравитационно-флотационному цианированию. На основании полученных результатов была разработана технологическая схема обогащения золотосодержащих руд. Также были получены флотационные концентраты, пригодные для последующего гидрометаллургического обработки.

## **ABSTRACT**

The results of this master's thesis present research aimed at determining the gravity and flotation enrichment of gold ores, as well as the development of technology for their enrichment. The initial ratio of gold sources is 1.53 g/t.

As for the literary analysis of existing technologies for processing gold-bearing material in various countries, the choice of this topic for the master's thesis was justified.

During the study, the granulometric characteristics of the original ore were studied, sieve analysis was carried out, and gravity-flotation cyanidation tests were carried out. Based on the results obtained, a technological scheme for the enrichment of gold ores was developed. Flotation concentrates suitable for subsequent hydrometallurgical processing were also obtained.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	7
1	Литературный обзор	9
1.1	Общие сведения золотосодержащих руд	9
1.2	Сырьевая база и мировой рынок золота	10
1.3	Золотодобывающая промышленность Казахстана	18
1.4	Методы обогащения золотосодержащих руд	22
1.5	Перспективы переработки золотосодержащих руд	23
1.6	Анализ литературного обзора и постановка задач исследований	28
2	Экспериментальная часть	30
2.1	Объект исследований	30
2.2	Гранулометрический состав исследуемой пробы руды	32
2.3	Фазовый анализ	37
2.4	Исследование руды на обогатимость гравитационными методами	39
2.5	Исследование обогащения хвостов гравитационного обогащения методами флотации	40
2.5.1	Измельчаемость хвостов гравитационного обогащения	40
2.5.2	Определения оптимальной крупности измельчение хвостов гравитационного обогащения методами флотации	41
2.5.3	Выбор оптимального расхода собирателя для флотации хвостов гравитационного обогащения руды	43
2.5.4	Выбор оптимальной плотности пульпы для флотации	45
2.5.5	Замкнутый опыт флотационного обогащения	47
2.5.6	Наработки флотационного концентрата на полупромышленной установке	49
2.5.7	Гидрометаллургические исследования	50
3	Наработка флотационного концентрата на полупромышленной установке	54
	Заключение	58
	Список использованной литературы	60
	Приложение А	61

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** В Казахстане обогащение золотосодержащих руд остаётся актуальным и важным направлением развития горнодобывающей промышленности. В стране имеется значительный потенциал золотодобычи, и развитие эффективных методов обогащения позволяет максимально использовать эти ресурсы.

Одним из ключевых факторов актуальности обогащения золотосодержащих руд в Казахстане является постоянный рост спроса на золото на мировых рынках. Золото остается важным объектом инвестирования и является необходимым компонентом в производстве ювелирных изделий и в других отраслях промышленности.

Кроме того, разнообразие типов золотосодержащих руд в Казахстане требует разработки и применения различных технологий обогащения для максимальной эффективности и экономической целесообразности. Использование современных методов обогащения, таких как комбинация гравитационных и флотационных методов, помогает обрабатывать сложные руды и извлекать золото из них.

Более того, развитие обогатительных предприятий способствует созданию новых рабочих мест, развитию технологического потенциала и повышению экономического благосостояния регионов, где проводится добыча золота.

Таким образом, обогащение золотосодержащих руд в Казахстане продолжает оставаться актуальным и востребованным направлением деятельности, вносящим существенный вклад в экономическое развитие страны.

**Объектом исследований** являлась золотосодержащая руда месторождения «Пустынное»

**Предмет исследований** – отработка технологии обогащения золотосодержащей руды месторождения "Пустынное".

**Цель магистерской диссертации** отработка технологии наработки флотационного концентрата на полупромышленной установке из первичной руды месторождения «Пустынное».

**Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:**

- изучить вещественный состав;
- исследовать гравитационную обогатимость в центробежном концентраторе;
- исследовать флотационную обогатимость руды;
- исследовать процесс цианирования флотоконцентратов;
- разработать технологическую схему обогащения;
- собрать полупромышленную установку и провести наработку флотационного концентрата.

**Научная новизна работы.** Заключается в проведении комплексных лабораторных испытаний, направленных на исследование обогатимости золотосодержащей руды при использовании гравитационных, флотационных методов и методов гидрометаллургии.

**Практическая значимость.** Пилотные установки могут быть полезны для определения реагентного режима фабрики и для создания геологических карт, в промышленности пилотные установки используются для тестирования новых процессов или материалов, а также для оптимизации существующих процессов производства. Их данные могут помочь определить эффективность использования реагентов в производственных процессах.

# 1 Литературный обзор

## 1.1 Общие сведения золотосодержащем сырье

Золотосодержащее сырье представляет собой горные породы или руды, содержащие в своем составе золото в виде минералов или включений. Золото может находиться в руде в различных формах, включая металлическое золото, сульфидные и окисленные соединения, а также в виде смешанных соединений [1,4,7].

Основные источники золотосодержащего сырья включают золотые рудники, открытые и подземные золотодобывающие предприятия, а также россыпи и месторождения россыпного золота. Золотосодержащие руды могут быть найдены в различных геологических формациях, включая кварцевые жилы, песчаники, шисты, и россыпи, с различными характеристиками геологической структуры и содержанием золота [2,4,7].

Добыча и обогащение золотосодержащего сырья являются сложными технологическими процессами, требующими применения различных методов и технологий, таких как гравитационное и флотационное обогащение, химические методы извлечения золота из руды, а также гидрометаллургические процессы [3].

Геологическое разнообразие: Золотосодержащие руды могут быть найдены в различных геологических образованиях, включая кварцевые жилы, пегматиты, песчаники, шисты, конгломераты и россыпи. Разнообразие геологических условий определяет разнообразие методов и технологий добычи и обогащения.

Минералогия и геохимия золота: Изучение минералогии золота позволяет понять его различные формы в руде, включая металлическое золото, сульфиды (например, пирит, халькопирит), оксиды (например, гематит, магнетит) и другие соединения. Геохимические анализы также позволяют определить месторождения золота и характеристики их содержания.

Методы добычи: Включает обзор различных методов добычи золота, таких как открытая и подземная добыча, гидравлический майнинг, добыча в рудниках и на россыпях.

Технологии обогащения: Рассматривает различные методы обогащения золотосодержащего сырья, такие как гравитационное обогащение (центрифугирование, шейкерные столы), флотация (использование различных флотационных реагентов), а также химические методы извлечения золота (цианидация, хлорирование).

Гидрометаллургические процессы: Включает обзор различных гидрометаллургических методов извлечения золота из концентратов и руды, таких как обжиг, выщелачивание, электролиз и цианирование.

Экологические аспекты: Изучение влияния добычи и обогащения золота на окружающую среду, включая анализ экологических рисков и методов минимизации воздействия на экосистемы и водные ресурсы [6].

**Экономическая эффективность:** Оценка экономической целесообразности различных методов добычи и обогащения золотосодержащего сырья, включая анализ затрат и доходности производства.

**Технологические инновации:** Рассмотрение современных технологических разработок и инноваций в области добычи и обогащения золотосодержащего сырья, таких как использование наноматериалов, автоматизация процессов и применение новых методов анализа и обработки данных.

Эти аспекты обеспечат полное представление о золотосодержащем сырье и различных методах его добычи и обогащения, а также позволят оценить его важность в современной горнодобывающей промышленности.

## **1.2 Сырьевая база и мировой рынок золота**

Золото редкий металл, его среднее содержание в земной коре составляет всего 3 мг/т. Тем не менее, месторождения золота распространены достаточно широко, имеются на территории более ста стран на всех континентах и встречаются в самых разнообразных геологических обстановках. Основными источниками золота служат собственно золоторудные коренные месторождения и коренные месторождения комплексных руд, в которых золото присутствует в качестве попутного компонента, а также в меньшей степени россыпи, где концентрируется золото, высвобожденное при разрушении коренных месторождений. Запасы (reserves) золота в мире по данным Геологической службы (ГС) США оцениваются в 52 тыс. т.

Общепринятой классификации геолого-промышленных типов месторождений золота не существует. По нашей оценке, около 80% мировых запасов сосредоточено в месторождениях, которые можно отнести к следующим восьми типам:

месторождения золото-серебряных и золото-теллуридных руд, приуроченные к вулcano-плутоническим структурам, содержат около 16 % мировых запасов золота. Типичные объекты этого типа: Янакоча (Перу), Паскуа-Лама (Чили), Купол, Асачинское, Родниковое, Многовершинное (Россия). месторождения золото-кварцево-сульфидных руд в углеродсодержащих песчано-сланцевых толщах включают 12 % мировых запасов. Наиболее известные месторождения этого типа: Телфер (Австралия), Мурунтау (Узбекистан), Сухой Лог, Наталкинское, Нежданинское, Майское (Россия).

Золотосодержащие меднопорфировые месторождения. В них заключено около 12 % мировых запасов золота, хотя главным полезным компонентом в их рудах является медь. Типичные месторождения этого типа: Грасберг (Индонезия), Пибл (США).

Месторождения золото-сульфидно-кварцевых руд в зеленокаменных поясах древних щитов, заключающие примерно 12 % мировых запасов.

Типичные месторождения: Калгурли, Боддингтон (Австралия), Детур-Лейк (Канада).

Месторождения золотоносных конгломератов, заключающие около 11,5 % мировых запасов золота. Самые значительные месторождения этого типа находятся в уникальном рудном районе Витватерсранд в ЮАР.

Месторождения золото-полисульфидных джаспероидных руд в терригенно-карбонатных толщах (карлинский тип); на их долю приходится около 8 % мировых запасов золота. Типичные месторождения находятся в США (Карлин, Голдстрайк); в последние десятилетия месторождения этого типа найдены также в Китае (Цзиньфын) и Бразилии (Паракуту).

Месторождения в хрупких геологических образованиях — малых интрузивах, поясах и сериях даек, а также эндо- и экзоконтактах интрузивных и гранито-гнейсовых массивов. Эти месторождения в сумме заключают около 5 % мировых запасов золота. Типичные месторождения: Донлин-Крик (США), Васильковское (Казахстан), Березовское (Россия), ТапаркоБурум (Буркина-Фасо) [9].

Россыпные месторождения, в которых заключено более 2 % мировых запасов золота.

Остальные 21 % запасов разведаны в разнообразных месторождениях, связанных с магматическими и метаморфическими комплексами и формировавшихся в различных геотектонических обстановках. Среди них важную роль играют месторождения с попутным золотом, прежде всего колчеданно-полиметаллические, сульфидные медно-никелевые и другие.

Золото-серебряные и золото-теллуридные месторождения пространственно и генетически связаны с вулканитами преимущественно кислого и среднего состава, нередко образующими в вулcano-тектонических сооружениях гипабиссальные и жерловые тела. Рудные тела (жилы, жильные зоны) приурочены к радиальным и кольцевым системам разломов и оперяющим их трещинам. Руды имеют сложный состав; характерно наложение разновременных минеральных ассоциаций, продуктивных и безрудных. Наряду с низкотемпературным кварцем в рудах присутствуют халцедон, адуляр, карбонаты, в том числе карбонат марганца. Золото низкопробное. Оруденение отличается относительно небольшим вертикальным размахом, даже на крупных месторождениях обычно не превышающим 500–800 м. Типичное месторождение этого типа — Янакоча (Перу), широко представлены они и в окраинно-континентальных вулканических поясах на востоке России (Купол, Кубака, Многовершинное).

Месторождения золото-кварц-сульфидных руд в углеродсодержащих песчано-сланцевых породах (формации черных сланцев) локализованы в умеренно «сжатых» складках, пересеченных зонами рассланцевания. Оруденение тяготеет к участкам пересечения зон рассланцевания с поперечными разрывами. Магматические образования в рудных полях значительной роли не играют. Залежи вкрапленных и вкрапленно-прожилковых руд имеют лентообразную форму; руды по большей части

бедные. Вертикальный размах оруденения средний (до 1000–1500 м). Руды месторождений этого типа часто труднообогатимы из-за повышенных содержаний мышьяка (в арсенопирите). Примерами объектов этого геологопромышленного типа служат такие крупнейшие месторождения, как Мурунтау в Узбекистане, Ашанти (Ashanti) в Гане, Сухой Лог, Наталкинское, Нежданинское, Кючус в России, Телфер (Telfer) в Австралии, Бакырчик в Казахстане, Кумтор в Киргизии. Высокомышьяковистыми рудами характеризуются крупные российские месторождения Олимпиадинское и Майское [10].

Золотосодержащие меднопорфировые месторождения связаны с крупными многофазными интрузивами гранитоидов. Рудные тела представляют собой штокверки с сетью рудных прожилков и подчиненной сульфидной вкрапленностью во вмещающих породах. Руды кварцево-сульфидные; преобладает пирит, в подчиненном количестве встречаются халькопирит, борнит, сульфиды свинца и цинка. Содержание золота, в основном заключенного в сульфидах, меняется в рудах от 0,4 до 1 г/т. Самые крупные месторождения этого типа — Грасберг (Grasberg) в Индонезии, Бингхем (Bingham), Пebbл (Pebble) в США.

Месторождения золото-сульфиднокварцевых руд в зеленокаменных поясах древних щитов залегают среди метаморфизованных вулканитов основного, реже ультраосновного или среднего состава с прослоями терригенных пород, обычно кварцитов. Крупнейшие месторождения этого типа связаны с мощными и протяженными системами разломов. Рудные тела имеют форму жил и прожилковых зон и часто приурочены к зонам дробления и расщепления, пересекающим смятые в складки метавулканиты. Руды простого кварцевого состава, обычно малосульфидные, с высокопробным золотом, образующим сравнительно крупные (до 3–5 мм) включения в кварце. Оруденение отличается самым большим для эндогенных месторождений вертикальным размахом, достигающим 3–3,5 км (Колар в Индии, Морру-Велью (Morro Velho) в Бразилии).

Самым крупным представителем этого типа является месторождение Лас-Кристинес-Брисас (Las Cristines-Brisas) на юге Венесуэлы. Многие месторождения, относящиеся к этому геолого-промышленному типу, полностью отработаны: Колар в Индии; Холлинджер (Hollinger), Дом (Dome) и Керр-Эйдисон (Kerr Adison) в Канаде, ряд месторождений среднего масштаба в Западной Австралии. Самые крупные месторождения золотоносных конгломератов сосредоточены в рудном районе Витватерсранд, ЮАР. Общая мощность рудоносной толщи Витватерсранд составляет около 8 км, она распространена на площади протяженностью около 450 км и шириной 25–50 км. Золотоносные пласты имеют мощность от нескольких дециметров до нескольких метров; золото содержится в цементе кварцевых конгломератов. В качестве попутных элементов в рудах присутствуют уран, платина, серебро. Существенно меньший масштаб имеют месторождения в

древних золотоносных конгломератах в Бразилии (Жакобина) и Австралии (Наллагайн).

Месторождения золото-полисульфидных джаспероидных руд размещаются в толщах углеродсодержащих карбонатных и глинисто-карбонатных пород, разбитых послойными и секущими рудовмещающими разрывами и рудоносными зонами дробления (пример последнего месторождение Гетчелл (Getchell) в США). Магматические проявления в пределах рудных полей чаще всего дорудные. Рудные тела приурочены к пластовым залежам кварцевых метасоматитов типа джаспероидов, тонко- и скрытокристаллических. Они не имеют четких границ и оконтуриваются только по данным опробования. Золото в рудах низкопробное, преимущественно тонкое и дисперсное (доли микрона). Распространены прожилки и вкрапленность пострудных низкотемпературных пирита и сульфидов сурьмы, мышьяка, ртути рисунок 1.

Необходимо также отметить существенно возросший потенциал месторождений, избирательно использующих сравнительно хрупкие (компетентные) геологические образования — малые интрузивы, пояса и серии даек. Лидером типа является гигантское осваиваемое золоторудное месторождение Донлин-Крик (Donlin Creek). Локализовано оно в протяженном (около 8 км) поясе сближенных даек риодацитовых порфиров и подчиненных базальтовых порфиритов, прорывающих песчаниково-сланцевые отложения мезозойского периода Аляска (США). В нем разведано 1210 т золота с содержанием металла 2,7 г/т.



Рисунок 1 – Распределение мировых запасов золота по геолого-промышленным типам в 2023 г., % (оценка ИАЦ «Минерал»)

Сходную позицию имеет крупнейшее в Китае золоторудное поле Линлун-Фушань (Linglong-Foshan), представляющее собой серию минерализованных зон длиной 6–8 км, локализованную в трещинной системе в гранитоидном интрузиве. Мощность золоторудных зон колеблется от долей метра до 286 м, содержание золота в среднем — 6,3 г/т. По нашей оценке, остаточные запасы золота могут достигать здесь 100–150 т. В малых интрузивах размещаются также рудные тела других крупнейших разрабатываемых месторождений: Сукари (Sukari), Египет (около 340 т благородного металла с содержанием 1,7 г/т), Васильковское в Казахстане (до 430 т), Чармитан в Узбекистане (более 210 т с содержанием 8 г/т), Ливенгуд (Livengood) в США.

Золотоносные россыпи год от года теряют свою значимость в мировом распределении запасов. Они остаются промышленно значимыми для минерально-сырьевой базы России, Китая и некоторых стран Южной Америки.

В последние годы в структуре мировых запасов золота произошли заметные изменения. За период с 2003 г. по 2013 г. на четверть уменьшились запасы активно эксплуатирующихся месторождений группы Витватерсранд в ЮАР. Эти месторождения разрабатываются уже на протяжении 130 лет, из их недр извлечено около 30 % золота, добытого человечеством. Прирост запасов рудного района Витватерсранд обеспечивает лишь доразведка флангов и глубоких горизонтов действующих рудников, и она не компенсирует погашения запасов при добыче. Значительно уменьшились также запасы месторождений золото-полисульфидных джаспероидных руд в терригенно-карбонатных толщах, за счёт интенсивной отработки месторождений этого типа в штате Невада (США). Стремительно сокращаются запасы россыпного золота.

С другой стороны, увеличиваются запасы золото-кварцево-сульфидных руд в углеродсодержащих песчаносланцевых толщах. Запасы рассматриваемого типа в целом за 8–10 лет выросли примерно на 1700 т главным образом за счет доразведки двух месторождений-гигантов в России — Сухой Лог и Наталкинское. Значительно возросла роль золотосеребряных месторождений в вулканических поясах, прежде всего, благодаря открытию крупных объектов в Латинской Америке.

Огромное значение приобрели месторождения комплексных золотосодержащих руд меднопорфирирового типа, с ними сегодня связано около 95% попутного золота в мире. За последнее десятилетие разведан целый ряд таких месторождений. В их числе такие гиганты, как Ую-Толгой (Oyu Tolgoi) в Монголии с ресурсами (measured+indicated+inferred resources) золота, превышающими 1400 т, Пebbл (Pebble) на Аляске – при 3300 т, Серро-Касале (Cerro Casale) в Чили – более 965 т, группа месторождений Кейдиа (Cadia) в Австралии – 1030 т и другие.

Месторождения золота известны более чем в 110 странах мира, при этом более 60 % мировых запасов сосредоточено в недрах восьми из них: ЮАР,

США, России, Узбекистана, Канады, Индонезии, Австралии и Чили. Лидирующее положение среди стран – держателей запасов занимает ЮАР (рисунке 2).

В России запасы золота категорий на начало 2012 г. составляли 8098 т, С2 – 4407 т. По официальным данным, в стране имеется 5970 месторождений золота, 5489 из которых – россыпи. При этом почти 60% разведанных запасов металла сосредоточено в собственно золоторудных, еще более четверти — в комплексных месторождениях. Доля россыпей в последние годы неуклонно сокращается, а с завершением разведки двух сверхкрупных коренных месторождений (Сухой Лог и Наталкинское) доля коренных месторождений составила уже около 86 % запасов золота России. Тем не менее, доля россыпного золота в запасах по-прежнему существенно превышает средний мировой уровень и составляют около 14 %. Качество российских россыпных месторождений постепенно снижается.

Месторождения золота на территории страны известны от Балтийского щита на западе до складчатых структур Восточной Чукотки, однако около двух третей прогнозных ресурсов и запасов золота находится в районах Восточной Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока. Значительная часть запасов и прогнозных ресурсов сконцентрирована также в Уральском регионе. Здесь размещается и подавляющая часть золотых месторождений России, в этих же регионах ожидается обнаружение новых месторождений, в том числе значительного масштаба.

Велики и балансовые запасы золота, заключенные в комплексных месторождениях, которые составляют более четверти российских. Среди более чем 150 комплексных золотосодержащих месторождений России выделяются шесть основных геолого-промышленных типов: медно-колчеданный, медно-никелевый, полиметаллический, свинцово-цинковый, медноскарновый и медно-порфировый. В отличие от зарубежных стран, где основные запасы комплексных руд приходятся на медно-порфировый тип, в России большая часть запасов связана с медно-колчеданным и медно-никелевым геолого-промышленными типами [11].

Прогнозные ресурсы золота России категории оцениваются в 4,9 тыс. т, категории Р2 в 9,4 тыс. т, категории Р3 в 22,7 тыс. т. Большая часть их локализована в регионах, расположенных к востоку от Енисея.

Пять российских объектов, относящихся к геолого-промышленному типу месторождений золото-кварц-сульфидных руд в углеродсодержащих песчано-сланцевых толщах — Сухой Лог, Наталкинское, Олимпиадинское, Благодатное и Нежданинское – включают почти две трети золота страны.

Осваиваемое уникальное месторождение Сухой Лог в Иркутской области содержит более 1300 т золота при среднем содержании его в руде 2,1 г/т. Оно локализовано в толще верхнепротерозойских углеродсодержащих аргиллитов, алевролитов и песчаников. Роль рудовмещающей структуры играет зона смятия мощностью 200 м, наклоненная под небольшим углом по отношению к осевой плоскости антиклинальной складки. Оруденение

представлено наблюдается штокверковой и прожилково-вкрапленной золото-кварц-пиритовой минерализацией и золото-кварцевыми жилами мощностью до 1–1,5 м. Главная промышленная залежь мощностью 70 м прослежена на 3,5 км по простиранию и на 1,5 км по падению. Она характеризуется невысокими, но устойчивыми средними содержаниями золота (около 2,1 г/т). Основные концентраторы золота — кварц-пиритовые прожилки, количество которых составляет 5–6 на метр. Отмечаются выделения золота двух типов: раннее тонкодисперсное мышьяковистое пробностью 910 и позднее, более крупное (доли миллиметра), встречающееся в виде включений в пирите и других сульфидах, пробностью 860 в пирите заключено более 60 % металла.

Разведанные запасы осваиваемого месторождения Наталкинское в Магаданской области после проведенной доразведки и переоценки увеличились с 128,5 до 1262,8 т при среднем содержании золота в рудах, понизившемся с 4,2 до 1,7 г/т.

Наталкинское рудное поле площадью 40 км<sup>2</sup> ограничено разломами и сложено ниже- и верхнепермскими осадочными породами общей мощностью более 2000 м. Они прорываются редкими дорудными дайками лампрофиров и диорит-порфиристов. Оруденение контролируется системой крутопадающих разломов. В пределах рудного поля, кроме Наталкинского, находятся месторождения Павлик, Омчак, а также ряд рудопроявлений, что делает его одним из наиболее перспективных золоторудных объектов не только в России, но и в мире.



Рисунок 2 – Распределение запасов золота по странам мира в 2013 г., % (оценка ИАЦ «Минерал»)

Рудная залежь месторождения Наталкинское представляет собой минерализованную зону, пронизанную сетью кварцевых жил, линз, зон брекчирования, тонких ветвящихся или параллельных прожилков кварца, с участками окварцевания, иногда сплошного, и сульфидизации различной

интенсивности. Мощность кварцевых прожилков — обычно около 5 мм, иногда до 30 мм. В пределах рудных тел темно-серые углисто-глинистые сланцы прокварцованы, карбонатизированы и серицитизированы и несут прожилки золотоносного кварца и вкрапленность сульфидов, среди которых преобладают арсенопирит и пирит. Золото — видимое, заключено в кварце (выделения от 0,004 до 2 мм), или дисперсное в арсенопирите (включения от 5 до 200 мкм). Его пробность колеблется от 620 до 800, в среднем 750.

Олимпиадинское месторождение (Красноярский край) открыто в 1975 г. и разрабатывается с 1985 г. За это время добыто, по нашей оценке, более 300 т металла; остаточные запасы месторождения категорий на сегодняшний день составляют около 300 т золота. Рудное поле месторождения сложено метатерригенно-карбонатными, в том числе углеродсодержащими породами (метаморфическими сланцами) раннерифейского возраста. Месторождение приурочено к ядру гребневидной антиклинали субширотного простирания, вдоль крыльев которой прослеживаются два крутопадающих рудоконтролирующих разлома. Расположенное в восточной части месторождения основное рудное тело, в котором сосредоточено около 90% запасов, имеет седловидную форму. Общая протяженность его на поверхности около 600 м, мощность в замке складки 400 м. Разрабатываются как первичные, так и окисленные руды. Первичные руды — вкрапленные и прожилково-вкрапленные, золото-сульфидные. Основную роль играет пирит, присутствуют также пирротин и арсенопирит в количестве 2–5%. Золото в первичных рудах «упорное», тонкодисперсное; оно заключено в сульфидах, чаще всего в арсенопирите. Окисленные руды, приуроченные к линейным корам выветривания мел-палеогенового возраста, имеют мощность 250–300 м и представляют собой пестроцветные рыхлые глинисто-алевритовые образования. Золото в окисленных рудах свободное, легко извлекаемое.

Важное значение в минерально-сырьевой базе золота России имеют эпитермальное золото-серебряные месторождения в мезо-кайнозойских вулканических поясах, маркирующих древнюю окраину континента на востоке страны. Важнейшими из них являются Купол, Многовершинное, Кубака.

Месторождение Купол, разведанные запасы которого к началу 2012 г. составляли 47,6 т золота и 659 т серебра при среднем их содержании в руде 18,9 г/т и 261,7 г/т соответственно, приурочено к вулканотектонической депрессии, сложенной верхнемеловыми андезитами и их туфами, прорванными субвулканическими телами риолитов. Субмеридиональная зона минерализации длиной 3,5 км и шириной до 100 м включает серию субпараллельных ветвящихся кварцевых и адуляр-кварцевых жил и прожилков. Жилы имеют протяженность 180–2400 м, мощность от первых дециметров до 5–6 м и сопровождаются ореолами околожилных метасоматитов. Установленный размах оруденения 300 м. На месторождении выделяется ряд рудных тел сложной морфологии. Состав руд существенно адуляр-кварцевый; количество рудных минералов, представленных пиритом,

арсенопиритом, халькопиритом и сульфосолями серебра, не превышает 5%. Золото преимущественно тонкое и тонкодисперсное (менее 0,074 мм), находится в сростании с кварцем и сульфидами; пробность его — 610–730. Содержание золота в руде варьирует от 0,02 до 154,3 г/т, серебра — от 0,02 до 2196,1 г/т. Отношение золота к серебру уменьшается с глубиной от 1:1,6 до 1:50.

### 1.3 Золотодобывающая промышленность Казахстана

Казахстан – государство в центре Евразии, бóльшая часть которого относится к Азии, а меньшая – к Европе. Казахстан граничит с Россией, Китаем, Киргизией, Узбекистаном и Туркменистаном [12]. Самая длинная граница с Россией – 7591 км (самая длинная непрерывная сухопутная граница в мире). По площади занимает 9-е место в мире (2,7 млн км<sup>2</sup>), 2-е – среди стран СНГ (после России). Численность населения – 17,3 млн (2014), столица – Астана.

**Характеристика золотодобывающей промышленности.** В советское время добыча золота в Казахстане достигала 20 тонн, к концу 1990-х упала до 8,8 т (1998). К настоящему времени Казахстан нарастил добычу золота в несколько раз (рис. 1). По предварительным результатам 2014 года страна занимает 16-е место в мире (47,8 т) среди ведущих стран-золотодобытчиков. В 2014 году (по сравнению с 2013-м) добыча золота выросла на 5,4 тонны, то есть на 13 %.

Руководство Казахстана поставило перед собой цель достичь уровня ежегодного производства золота — 70 т. Как быстро удастся добиться этой отметки, покажет будущее. Сырьевая база страны это позволяет.

Вице-министр индустрии и новых технологий Казахстана Нурлан Сауранбаев в марте 2014 года сообщил на брифинге, что месторождения Казахстана содержат в своих недрах 1159 тонн балансовых запасов золота по категориям А, В и С1. По его словам, 1159 тонн — это промышленные запасы, готовые к отработке. «Дополнительно у нас есть еще 1107 тонн золота по категории, которые надо доисследовать. Вместе получается 2267 тонн золота», сказал Сауранбаев. Прогнозные ресурсы золота в Казахстане оцениваются в 9,565 тыс. тонн, в том числе на золоторудных месторождениях 7725 тонн, на комплексных золотосодержащих 1840 тонн.

Сырьевая база золотодобывающей промышленности Казахстана представлена в основном мелкими (с запасами до 25 т) и средними (от 25 до 100 т) месторождениями. В общей сложности в Казахстане насчитывается 293 месторождения золота (в том числе 38 % комплексных, 60 % золоторудных и 2 % россыпных). Месторождения обнаружены во всех областях страны. Однако лидирующее положение занимают месторождения Восточного, Северного и Центрального Казахстана (рис. 2).

В настоящее время лицензии выданы примерно на половину числящихся месторождений, из них в эксплуатации находится около 30.

Традиционно большая часть золота Казахстана добывается из комплексных месторождений. Крупнейшая золотодобывающая компания Казахстана, «Казцинк», добывает золото в качестве попутного продукта при разработке полиметаллических руд. Производство золота за 2012 год составил 14,7 т, 2013 — 18 т [13,14].

Компания «KAZ Minerals» (ранее «Казахмыс»), крупнейший в стране производитель меди, также попутно извлекает из руды золото. В 2012 году производство золота составило 3,6 т (при содержании 0,66 г/т), в 2013-м — 3,2 т (при содержании 0,61 г/т).

Крупнейшим в Казахстане золоторудным объектом является месторождение «Васильковское» в 17 км северо-западнее города Кокшетау. Доказанные запасы Васильковки составляют 370 т золота, при среднем содержании металла в руде 2,8 г/т. Месторождение разрабатывается с 1979 года. С 1991 года на Васильковском горно-обогатительном комбинате проводились полупромышленные испытания переработки руд с применением метода кучного выщелачивания. (Это был первый опыт в СССР. Работы велись с участием союзного НИИ «Иргиредмет»). Производительность установки кучного выщелачивания составляла 1 млн т руды в год со среднегодовым производством от 600 до 900 кг золота.

В 2007 году на месторождении началось строительство крупной золотоизвлекательной фабрики с современной технологией. При полной проектной мощности рудник должен выдавать 15 тонн золота в год. Капиталовложения составляли около 700 млн долл. Построили фабрику за два года. На церемонии открытия президент Казахстана Назарбаев заявил, что это крупнейший в Казахстане, да и вообще в мире, завод, который будет добывать и выпускать золото. В 2010 году по предложению главы государства Васильковский ГОК был переименован в компанию «Altyntau Kokshetau».

Второе место по величине запасов занимает месторождение «Бакырчик», расположенное на северо-востоке Казахстана (приблизительно в 100 км от города Семипалатинска). Его рудные запасы составляют 208 т при среднем содержании 7,5 г/т, а минеральные ресурсы — 118 т при среднем содержании 6,9 г/т (с учетом месторождения «Большевик»). Месторождение будет сначала разрабатываться открытым способом с последующей подземной добычей. Начало производства запланировано на 2-е полугодие 2018 года. Разработка месторождения затруднена из-за высокого содержания в руде углерода, а также токсичного мышьяка, что создает угрозу загрязнения окружающей среды. Месторождение интересно для отработки с применением технологии бактериального или автоклавного выщелачивания флотоконцентратов. С 2014 года месторождение «Бакырчик» принадлежит компании «Полиметалл». Ожидаемые капиталовложения в строительство рудника оцениваются по различным ТЭО от 420 млн до 1 млрд долларов.

Следующими по промышленной значимости можно отметить месторождения «Аксу», «Бестюбе», «Жолымбет» — они все отрабатываются подземным способом. Руды на месторождениях представлены как кварцево-

жильные, так и в виде минерализованных зон. Разработка месторождений этой группы была начата в 1930-е годы. Рудники расположены в радиусе 100 км от центральной базы, расположенной в Степногорске (Акмолинская область). Наиболее богатые и легкодоступные руды выработаны, в связи с этим в период низких цен на золото произошел спад производства. Однако общие запасы золота этих рудников значительные — более 100 т, а прогнозные — более 400 т. В 2005 году с участием Иргиредмета (составившего технологические регламенты) состоялся запуск гидрометаллургических цехов на рудниках «Аксу», «Жолымбет» и «Бестюбе». На руднике «Аксу» пущен в эксплуатацию участок кучного выщелачивания производительностью 500 тыс. т руды в сезон.

Несмотря на то, что крупные и средние месторождения Казахстана (табл. 1) в настоящее время большей частью уже распределены, в стране имеется значительное количество небольших месторождений, которые требуют доразведки. Однако большого спроса на эти месторождения со стороны инвесторов пока не наблюдается. Правительство Казахстана для привлечения инвестиций рассматривает возможности изменения горного законодательства с целью сделать его более привлекательным для инвесторов, при этом за основу предполагается принять австралийский опыт.

Таблица 1 – Крупные месторождения золота Казахстана

Регион	Месторождение
Северный Казахстан	Васильковское, Варваринское, Узбой, Сымбат, Комаровское, Элеваторное, Аккаргинское, Жетыгоринское
Центральный Казахстан	Аксу, Жолымбет, Бестюбе, Майкаин, Кварцитовые Горки, Енбекши, Пустынное
Восточный Казахстан	Бакырчик, Суздальское, Большевик, Васильевское, Риддер-Сокольное, Жанан, Акжал, Каскабулак
Южный Казахстан	Акбакай, Алтынтас, Далабай, Аксакал-Бескемпир, Мынарал, Жаркулак, Карамурун, Архарлы, Кумысты
Западный Казахстан	Юбилейное

Некоторые аспекты горного законодательства Казахстана. Современная версия закона Республики Казахстан «О недрах и недропользовании» принята 24 июня 2010 года. В соответствии с Конституцией Республики Казахстан, недра и содержащиеся в них полезные ископаемые находятся в государственной собственности, а добываемое минеральное сырье (если иное не предусмотрено) – недропользователю.

Горный закон предполагает 5 видов прав недропользования:

- государственное геологическое изучение недр;
- разведка;
- добыча;
- совмещенная разведка и добыча;

– строительство и эксплуатация подземных сооружений, не связанных с разведкой или добычей.

Право недропользования может быть постоянным или временным, отчуждаемым или неотчуждаемым, возмездным или безвозмездным.

Субъектами права недропользования могут быть казахстанские и иностранные физические и юридические лица. Недропользователи должны являться субъектами предпринимательской деятельности, за исключением лиц, осуществляющих добычу общераспространенных полезных ископаемых и подземных вод для собственных нужд.

Субъектами права недропользования по одному контракту могут быть несколько лиц. Такие лица являются совместными обладателями права недропользования и несут солидарную ответственность по обязательствам, возникающим на основе контракта.

Геологический и горный отводы выдаются уполномоченным органом победителю конкурса или лицу, которому предоставляется право недропользования без проведения конкурса. Победитель определяется по итогам рассмотрения конкурсных предложений: размера подписного бонуса и размера расходов на социально-экономическое развитие региона и развитие его инфраструктуры.

Без проведения конкурса на основе прямых переговоров заключаются контракты: на проведение операций по добыче с лицом, имеющим исключительное право на получение права недропользования в связи с коммерческим обнаружением на основании контракта на разведку; на проведение операций по строительству и (или) эксплуатации подземных сооружений, не связанных с разведкой или добычей; на проведение операций по разведке и (или) добыче с национальной компанией. Горным законом Казахстана предусмотрена возможность передачи права недропользования и объектов, связанных с правом недропользования.

Недропользователь, обнаруживший и оценивший месторождение на основании контракта на разведку, имеет исключительное право на заключение контракта на добычу без проведения конкурса на основе прямых переговоров.

При получении права недропользования (напрямую или по результатам конкурса) правообладатель обязан подготовить пакет документов: проект контракта на недропользование, рабочую программу, проект поисковых работ, проект оценочных работ, проектные документы на проведение работ по добыче.

Контракт на разведку заключается на срок до 6 лет, а добычу — на срок не более 25 лет (по месторождениям с крупными и уникальными запасами полезных ископаемых — не более 45 лет).

## 1.4 Методы обогащения золотосодержащих руд

Существует несколько методов обогащения золотосодержащих руд, которые используются в промышленности. Вот некоторые из основных методов:

**Флотация:** Этот метод используется для обогащения сульфидных руд. В процессе флотации золото и другие полезные минералы привязываются к пузырькам воздуха и поднимаются на поверхность руды, где их собирают.

**Гравитационное обогащение:** Этот метод основан на различии в плотности между золотом и окружающими материалами. При использовании гравитационных методов, таких как центробежные концентраторы, шейкерные столы или спиральные сепараторы, золото может быть разделено от других минералов.

**Цианидное обогащение:** Цианидный процесс обогащения широко применяется для извлечения золота из руд, содержащих золото в виде микроскопических частиц. В этом процессе золото растворяется в растворе цианида, а затем извлекается путем адсорбции на активированном угле или резине.

**Окислительное обогащение:** Этот метод применяется к сульфидным рудам, содержащим золото, которое не может быть извлечено с помощью простых гравитационных или флотационных методов. В процессе окислительного обогащения сульфидные руды подвергаются окислительным реагентам, чтобы превратить сульфиды в оксиды или другие легко обрабатываемые соединения[15,16].

**Электрообогащение:** Этот метод используется для очистки концентрата золота от примесей. В процессе электрообогащения золото осаждается на катоде при помощи электрического тока, который приводит к растворению примесей в электролите.

Эти методы могут применяться отдельно или в комбинации в зависимости от характеристик руды, экономической целесообразности и других факторов.

Процесс обогащения представляет собой единую систему, в которой отдельные элементы являются взаимосвязанными. Добиться высоких результатов можно только с учетом системного подхода, при котором учитывается взаимодействие элементов системы, то есть в данном случае полный комплекс процессов[14,16].

Гравитационное обогащение, несомненно, один из наиболее известных процессов. Именно ему история обязана тем, что золото явилось первым металлом, с которым ознакомилось человечество за несколько тысячелетий до нашей эры. Сама природа позаботилась об этом, освобождая золотины от вмещающих их минералов в руслах рек и ручьев, протекающих по золотоносным породам, придав им такую привлекательность, на которую не могли не обратить внимание наши далекие предки. С гравитационных методов обогащения началась массовая добыча золота из россыпей, после чего эти

методы активно «шагнули» и в фабричную технологию переработки руд коренных месторождений. В настоящее время гравитационное концентрирование золота достаточно широко применяют на золотоизвлекательных фабриках (ЗИФ) во всех странах мира, в том числе и тех, которые являются основными производителями данного металла.

К I группе отнесены предприятия, осуществляющие извлечение золота и сопутствующего ему серебра из относительно простых в технологическом отношении кварцевых и кварцево-сульфидных руд, содержащих благородные металлы преимущественно в цианисторастворимой форме.

В группу II включены ЗИФ, перерабатывающие упорные для цианирования пиритные и мышьяково-пиритные руды с тонковкрапленным золотом в сульфидах, а также руды, содержащие сорбционно-активное углистое вещество.

Наконец, группу III составляют предприятия по переработке комплексных руд, содержащих, наряду с золотом и серебром, тяжелые цветные металлы (медь, свинец, цинк, сурьму), а также уран.

Внутри каждой группы определено количество предприятий, применяющих процессы гравитационного, флотационного обогащения и цианирования (табл. 2,3).

Таблица 2 – Масштабы, применения гравитации, флотации и цианирования на ЗИФ

Наименование показателей	Группы предприятий			
	I Простые руды	II Упорные руды	III Комплексные руды	Всего
Общее число ЗИФ	142	53	44	239
В том числе количество ЗИФ, применяющих:				
Гравитацию	42	17	19	78
Флотацию	26	36	43	106
Цианирование	137	47	25	209

Таблица 3 – Гравитационное обогащение руд на ЗИФ

Наименование показателей	Группы предприятий			
	I Простые руды	II Упорные руды	III Комплексные руды	Всего
Количество ЗИФ, применяющих гравитационное обогащение	42	17	19	78
В том числе: в качестве единственного технологического процесса	1	-	-	1
в комбинации с цианированием	23	-	-	23
в комбинации с флотацией (без цианирования)	2	3	5	10
в комбинации с флотационным обогащением и цианированием	16	14	14	44

Несмотря на то, что представленный в таблицах перечень ЗИФ является далеко неполным, он, тем не менее, достаточно объективно отражает современные тенденции производства золота из руд коренных месторождений и ту роль, которую играет каждый из перечисленных выше технологических процессов, в том числе и гравитация.

Из табличных данных видно, что гравитационное обогащение практикуют более 1/3 подвергнутых анализу ЗИФ, однако гравитация без сочетания с другими процессами почти не применяется.

В последние годы, в технологии гравитационного обогащения золоторудного сырья достигнут большой прогресс. Это проявляется, прежде всего, в создании новых аппаратов, способных извлекать не только крупные, но и очень мелкие частицы металлического золота, освобождаемые в процессе измельчения руды [17,18].

К таким аппаратам, в частности, относятся центробежные концентраторы (Нельсон, Фалькон, Кнудсен, из российских аналогов – Итомак) и центробежные отсадочные машины (Кэлси, российские ЦОМ), в которых интенсивность разделения частиц золота и других минералов с меньшей плотностью зерен многократно возрастает. Значительно усовершенствованы и ранее применявшиеся гравитационные приборы: обычные отсадочные машины с вертикальной пульсацией, многодечные концентрационные столы, винтовые сепараторы, аппараты конусного типа и др. Определены оптимальные сочетания различных гравитационных аппаратов, обеспечивающих максимальное извлечение золота при минимальных эксплуатационных затратах. Разработаны и реализованы в промышленных масштабах новые методы переработки гравикоцентратов, в

том числе и гидрометаллургические, основанные на использовании цианистого процесса.

Необходимо отметить, что в прежние времена цианирование гравитационных концентратов, содержащих крупные частицы золота и других тяжелых минералов (в частности сульфидов), в аппаратах бакового типа (механических и пневмомеханических агитаторах) считалось неприемлемым из-за низкой скорости растворения золота и трудностей поддержания суспензии во взвешенном состоянии, результатом чего являлось оседание тяжелых фракций на дне аппаратов. В настоящее время эти проблемы решаются благодаря использованию горизонтальных барабанных перемешивателей типа «Гекко», а также аппаратов с принудительной циркуляцией цианистых растворов типа «Акация» и российских конусных реакторов конструкции Иргиредмета. Эти аппараты позволяют обрабатывать цианированием золотосодержащие гравиоконцентраты практически с любой гранулометрической характеристикой. Таким образом, традиционная технология гравитационного концентрирования золота с глубокой доводкой первичных концентратов до богатых «золотых головок», пригодных для плавки на золотосеребряный сплав (металл Доре), дополняется альтернативным методом гидрометаллургической переработки концентратов с умеренным содержанием металла, после их одно- или двукратной перечистки на — концентрационных столах или других доводочных аппаратах. Это позволяет достигать более высоких показателей извлечения золота в гравитационном процессе. Эффективность такого варианта еще более возрастает, если цианированию подвергают не только гравиоконцентраты, но также и хвосты гравитационного обогащения руды (с использованием более «мягкого» режима выщелачивания), поскольку в этом случае существует возможность направлять твердые остатки «концентратного» цикла в общий гидрометаллургический процесс с получением в конечном итоге единого товарного продукта[18].

Важно подчеркнуть, что, в отличие от переработки золотосодержащих россыпей, гравитационное обогащение руд коренных месторождений чрезвычайно редко применяется в качестве единственного технологического процесса.

Из 239 ЗИФ, представленных в «Аналитическом обзоре» [1], такую технологию практикует только одна: фабрика рудника Сикстин Ту Ван Майн (США, штат Калифорния) [2]. Данное предприятие, являющееся одним из старейших в стране и функционирующее с 1896 г., перерабатывает богатые кварцевые руды с самородным золотом. За 100 лет эксплуатации на руднике с суточной производительностью менее 120 т руды по «чисто» гравитационной технологии добыто более 1 млн. унций золота (31,1 т). До 1997 г. переработку руды, добываемой подземным способом, проводили по схеме, включающей: крупное дробление в щековой и короткокonusной дробилках до крупности минус 12 мм, измельчение в шаровой мельнице (работающей в замкнутом цикле с отсадочной машиной и механическим классификатором) и

гравитационное концентрирование золота из слива классификатора на винтовых сепараторах. Хвосты сепараторов направляли в отвал, а концентрат — на доводку (концентрационные столы). Получаемую при доводке «золотую головку» подвергали плавке на металл Доре. Промпродукт доводки возвращали на винтовые сепараторы. В связи с повышенными потерями свободного золота с хвостами гравитационного обогащения (составляющими около 30% от исходного содержания металла) на ЗИФ были проведены испытания новых гравитационных аппаратов. По результатам испытаний принято решение об установке на выходе мельницы центробежного концентратора Нельсон КС-СД-20 с производительностью по твердому 14 т/ч, оснащенного сверху неподвижным грохотом со шпальтовым ситом 0,83 мм. Надрешетный продукт грохота посредством насоса возвращали обратно в мельницу; концентрат подвергали плавке, а хвосты центробежного концентратора — дополнительному обогащению на концентрационных столах «Дейстер». Проведенная реконструкция ЗИФ позволила поднять извлечение свободного золота с 70 до 90% при одновременном увеличении производительности по руде почти в 3 раза.

Опыт показывает, что «чисто» гравитационные схемы обогащения золоторудного сырья могут быть применимы на небольших по масштабам предприятиях, осваивающих так называемые «малые» месторождения. Строительство развитых комплексов с комбинированной обогатительно-металлургической технологией, обеспечивающих более высокое извлечение золота из руды, на малых месторождениях представляется экономически нецелесообразным, так как небольшое количество золота не может окупить строительства дорогостоящей фабрики.

В ряде случаев, как показывает опыт некоторых российских ЗИФ (Самаргинская в Бурятии, Первенец, Голец Высочайший в Иркутской области), гравитационный процесс с пониженным извлечением золота целесообразно использовать в качестве первого этапа освоения предприятия, имея целью накопление средств для последующего расширения производства и перехода на более сложную технологию. В последующем богатые хвосты первых этапов освоения месторождения могут быть с успехом переработаны с использованием, например, кучного выщелачивания.

В подавляющем большинстве случаев (77 из 78 предприятий, представленных в табл.3) гравитацию применяют в сочетании с цианированием, флотацией или обоими этими процессами. Для простых в технологическом отношении руд (группа I) наиболее характерны схемы гравитационного и гравитационно-флотационного обогащения с цианированием хвостов флотационных, а в ряде случаев и гравитационных концентратов. Главное назначение гравитации в этих вариантах — выведение из руды крупного свободного золота в продукты (концентраты), перерабатываемые в отдельном от основной массы руды металлургическом цикле.

Кроме повышения (как правило на 2–4% общего извлечения золота), это позволяет предотвратить или, по крайней мере, существенно снизить аккумуляцию золота в измельчительных и перемешивающих аппаратах.

## 1.5 Перспективы переработки золотосодержащих руд

Переработка золотосодержащих руд остается важной областью в горнодобывающей промышленности. Это направление обладает огромным потенциалом для улучшения технологий и методов, с целью повышения эффективности, снижения вредного воздействия на окружающую среду и обеспечения устойчивого развития. В данном обзоре мы рассмотрим текущее состояние и перспективы переработки золотосодержащих руд, а также основные направления исследований в этой области.

Золото является одним из наиболее ценных металлов и имеет широкое применение в различных отраслях промышленности, включая ювелирное дело, электронику и медицину. Его добыча и переработка связаны с рядом технических, экологических и социальных проблем. В данном обзоре мы рассмотрим современные методы и технологии переработки золотосодержащих руд, а также перспективы и направления дальнейших исследований.

Традиционные методы переработки золотосодержащих руд включают в себя гравитационное обогащение, флотацию, цианидацию и обработку через кислоты. Эти методы имеют долгую историю использования и широко распространены в промышленности. Однако они имеют свои недостатки, включая низкую эффективность извлечения золота, высокие затраты на оборудование и управление отходами, а также потенциальные негативные последствия для окружающей среды.

Биотехнологии представляют собой относительно новое направление в переработке золотосодержащих руд. Микроорганизмы, такие как бактерии и грибы, могут эффективно извлекать золото из руды путем биологического окисления и цианидации. Эти методы обладают рядом преимуществ, включая более низкие затраты, меньшее воздействие на окружающую среду и более высокую эффективность извлечения золота [20].

Развитие инновационных химических методов переработки является важным направлением исследований. Новые технологии, такие как хлорирование и экстракция с использованием неводорастворимых соединений, обещают улучшить процессы извлечения золота из руды и снизить негативное воздействие на окружающую среду. Эти методы требуют дальнейших исследований и тестирования перед их широким внедрением в промышленность.

Использование нанотехнологий представляет собой перспективное направление в переработке золотосодержащих руд. Наночастицы золота и другие наноматериалы могут быть использованы в качестве катализаторов для

химических реакций, что позволяет снизить температуру и увеличить скорость процесса переработки. Эти инновации имеют потенциал для значительного улучшения эффективности производства золота.

Управление отходами является важным аспектом переработки золотосодержащих руд. Эффективное использование технологий утилизации отходов и минимизация вредного воздействия на окружающую среду становятся все более важными задачами для промышленности. Внедрение методов рециркуляции и обработки отходов может существенно снизить негативное воздействие процессов переработки на окружающую среду.

Экономическая эффективность играет ключевую роль в развитии методов переработки золотосодержащих руд. Новые технологии должны быть не только экологически устойчивыми, но и экономически целесообразными для промышленного применения. Оценка затрат и прогнозирование прибыли от внедрения новых технологий являются важными шагами на пути к их широкому применению в промышленности.

Подводя итоги, можно сказать, что перспективы развития переработки золотосодержащих руд связаны с интеграцией различных технологий и методов. Биотехнологии, инновационные химические методы, нанотехнологии и управление отходами представляют собой основные направления развития. Дальнейшие исследования и инвестиции в эти области являются ключевыми для обеспечения устойчивого развития горнодобывающей промышленности и минимизации ее вредного воздействия на окружающую среду.

Переработка золотосодержащих руд остается важным и перспективным направлением в горнодобывающей промышленности. Развитие новых технологий и методов, с учетом требований эффективности, безопасности и экологической устойчивости, является ключевым фактором для обеспечения устойчивого развития отрасли в будущем [17-20].

Этот литературный обзор представляет более подробный анализ текущего состояния и перспектив развития переработки золотосодержащих руд, включая основные направления исследований и инноваций.

## **1.6 Анализ литературного обзора и постановка задач исследований**

На основании анализа литературного обзора установлено, что для переработки золотосодержащих руд могут быть применены гравитационные, флотационные и гидрометаллургические методы.

В связи с этим, для компоновки полупромышленной установки необходимо выполнить комплекс исследований на обогатимость с целью разработки технологической схемы переработки руды месторождения «Пустынное» которая будет заложена в полупромышленную установку.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить вещественный состав;
- исследовать гравитационную обогатимость в центробежном концентраторе;
- исследовать флотационную обогатимость руды;
- исследовать процесс цианирования флотоконцентратов;
- разработать технологическую схему обогащения;
- собрать полупромышленную установку и провести наработку флотационного концентрата.

## 2 Экспериментальная часть

### 2.1 Объект исследований

На исследование была предоставлена проба золотосодержащих руд общим весом 486,9 кг, причем отдельные куски имели максимальную крупность в пределах 30–10 мм.

Золото, представленное в минеральных формах сульфидов, является основным ценным компонентом в данной руде. Среди сопутствующих минералов преобладают кварц, арсенопирит, пирит, халькопирит, блеклые руды, теллуриды, галенит и сфалерит, при этом основное содержание железа представлено в виде пирита.

После естественной подсушки на открытом воздухе руда была измельчена до размера частиц не более 2 мм и усреднена методом "кольца и конуса". Схема разделки пробы руды представлена на рисунке 3.

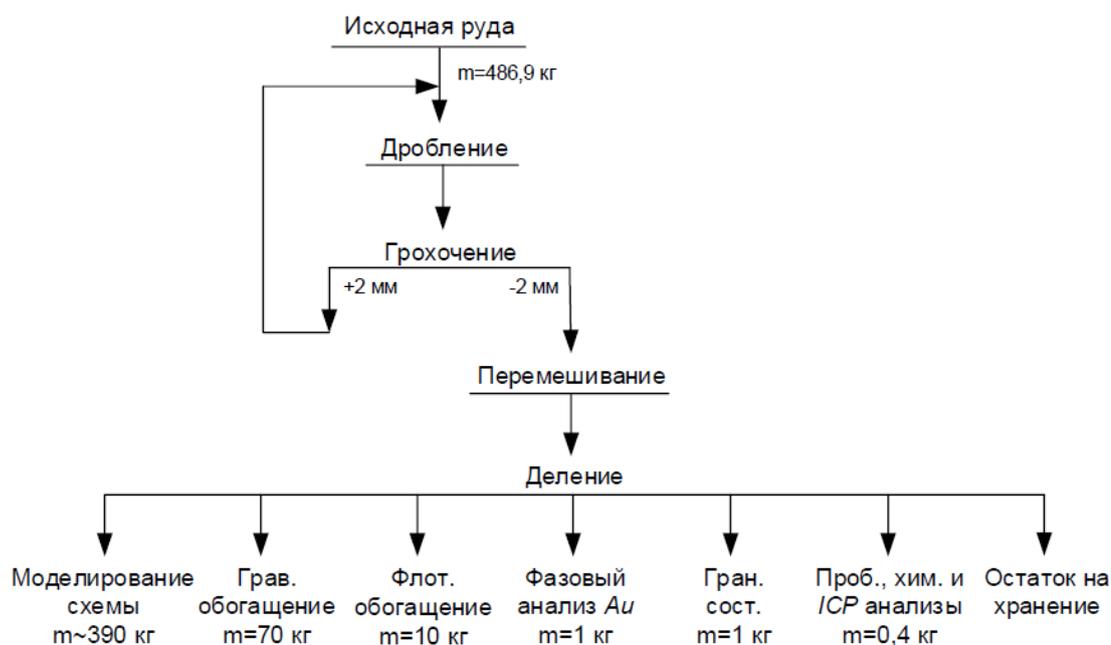


Рисунок 3 – Схема разделки пробы руды

В ходе разделки руды была отобрана проба для определения её химического состава. На основании результатов анализов, представленных в таблицах 4 и 5, содержание золота в данной пробе руды можно классифицировать как золотосодержащую.

Химический состав пробы руды был определен с использованием оптико-эмиссионного, атомно-абсорбционного, ИК-спектроскопического и гравиметрического методов анализа. Содержание золота и серебра в пробе было определено пробирным анализом.

Таблица 4 – Химический состав исходной руды

Содержание %															
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	0MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	C <sub>общ</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>орг</sub>	Fe <sub>об</sub>	Fe <sub>с</sub>	Fe <sub>о</sub>	S <sub>об</sub>
74,4	14,6	2,7	1,13	5,03	1,59	0,079	0,076	0,61	1,20	4,16	0,06	3,20	1,63	1,57	1,65

Таблица 5 – Химический состав исходной руды

Содержание %											
Zn	Pb	Cu	Ni	Sb	As	Cr	Ba	Sr	W	Ag, г/т	Au, г/т
00,005	0,001	0,002	0,01	0,005	0,0005	0,0057	0,067	0,035	0,0029	0,5	1,53

Согласно данным, представленным в таблицах 4 и 5, химический состав пробы руды в основном состоит из литофильных компонентов, преимущественно кремнезема, составляющего 74,4 % общей массы. Глинозем присутствует в количестве 14,6 %. Общее содержание оксидов щелочных и щелочноземельных металлов составляет 10,45 %.

Количество углерода в пробе составляет 1,20 %, преимущественно в виде карбонатов. Рудообразующие элементы, в основном железо и сера, присутствуют в количестве 3,20 % и 1,65 % соответственно. Железо преимущественно представлено в виде сульфидов и оксидов, соответственно 1,63 % и 1,57 %.

Количество цветных металлов и вредных примесей, таких как мышьяк и сурьма, не превышает сотых и тысячных долей процента, что не оказывает влияния на технологические процессы при переработке руды.

Единственным ценным компонентом в пробе является золото, содержание которого определено методом прямого пробирного анализа с использованием двух параллельных навесок для повышения достоверности результатов. Результаты анализа приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты приборного анализа

Номер пробы	1	2	Среднее значение
Содержание золота г/т	1,50	1,56	1,53

Согласно результатам прямого пробирного анализа, среднее содержание золота составило 1,53 г/т. В ходе технологических исследований, при обогащении укрупнённой навески руды массой 390 кг, было установлено, что содержание золота в пробе составило 1,38 г/т.

## 2.2 Гранулометрический состав исследуемой пробы руды

Произведен ситовой анализ пробы, осуществленный на материале размером до -2 мм. В процессе ситового анализа в каждом классе размеров определялось содержание золота, железа, серы, органического углерода, а также их распределение по классам крупности. Гранулометрический состав пробы представлен в таблице 7, а на рисунке 4 показана диаграмма распределения золота в пробе по классам крупности.

Анализируя гранулометрические характеристики, изображенные на рисунке 2, можно отметить, что основная часть материала пробы, имеющего размер до -2 мм, сосредоточена в крупных классах размеров в диапазоне от -2 до +0,5 мм, что составляет 58,53 % от общей массы. В остальных классах размеров материал пробы распределен равномерно с незначительными отличиями в выходе материала.

Таблица 7 – Гранулометрическая характеристика пробы руды

Кл. кр, мм	$\gamma$ , %	$\gamma_c$ , %	$\alpha_{Au}$ , г/т	$P_{Au}$ , %	$\alpha_{Fe}$ , %	$P_{Fe}$ , %	$\alpha_S$ , %	$P_S$ , %	$\alpha_{C_o}$ , %	$P_{C_o}$ , %
-2+1	33,22	100	0,98	22,76	2,94	30,65	1,57	30,14	0,088	46,23
-1+0,5	25,32	66,78	1,00	17,70	2,69	21,37	1,39	20,34	0,044	17,51
-0,5+0,315	10,94	41,47	1,06	8,10	2,87	9,85	1,53	9,67	0,077	13,40
-0,315+0,2	8,00	30,53	1,39	7,77	3,20	8,03	1,70	7,86	0,029	3,65
-0,2+0,1	6,18	22,53	2,40	10,36	3,72	7,21	2,10	7,50	0,046	4,48
-0,1+0,071	2,08	16,35	2,90	4,21	4,13	2,69	2,54	3,05	0,029	0,95
-0,071+0,045	3,39	14,28	2,90	6,88	7,74	5,05	3,04	5,96	0,016	0,87
-0,045+0,038	1,52	10,89	4,60	4,88	5,61	2,67	3,66	3,21	0,068	1,65
-0,038+0,020	1,92	9,37	3,60	4,84	5,71	3,45	3,66	4,07	0,106	3,24
-0,020+0	7,44	7,44	2,50	12,49	3,86	9,02	1,91	8,22	0,068	8,02
Итого	100	-	1,53	100	3,19	100	1,73	100	0,063	100

Согласно данным гранулометрического анализа, содержание золота в пробе составляет 1,53 г/т, с отклонениями в различных классах крупности в пределах от 0,98 до 4,60 г/т. Распределение золота по классам крупности неравномерное, преимущественно концентрируясь в тонких классах от -0,2 до +0 мм. В этих классах отмечается повышение содержания золота по сравнению с исходным уровнем в пробе.

Количество железа в пробе составляет 3,19%, а в различных классах крупности варьируется от 2,69 до 5,71%. Содержание серы составляет 1,73% и изменяется от 1,39 до 3,66% по классам крупности. Уровень органического углерода в пробе составляет 0,063%, а его содержание по классам крупности колеблется от 0,016 до 0,106%.

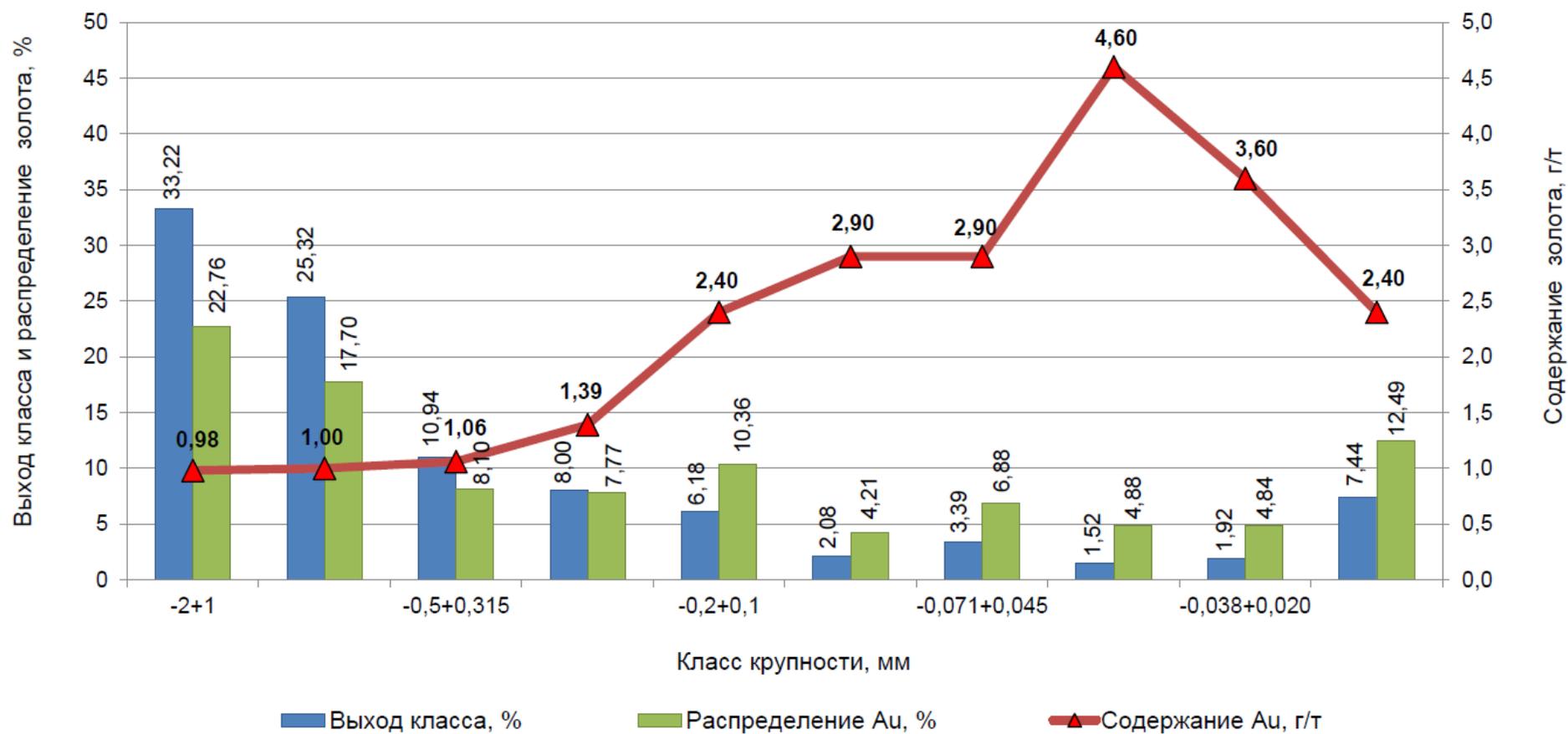


Рисунок 4 – Гранулометрическая характеристика пробы руды с распределением золота по классам крупности

### 2.3 Фазовый анализ

Для изучения форм нахождения золота, его взаимосвязи с рудными и породообразующими минералами, а также оценки степени высвобождаемости в пробе руды был выполнен фазовый анализ. Процесс амальгамации проводился поэтапно с уменьшением размера материала от исходной (-2 мм) до 95% класса размеров -0,071 мм. Результаты данного анализа представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты фазового анализа золота пробы руды

Форма золота	$\alpha_{Au}$ , г/т	$P_{Au}$ , %
Свободное, с чистой поверхностью при крупности -2 мм	0,08	5,37
Свободное, с чистой поверхностью при крупности 60% класса - 0,071 мм	0,31	21,21
Свободное, с чистой поверхностью при крупности 95% класса - 0,071 мм	0,15	10,20
Всего свободного золота с чистой поверхностью	0,54	36,78
В виде открытых сростков с рудными и породообразующими минералами (цианируемое)	0,64	43,81
Всего в цианируемой форме	1,25	80,59
В кислоторастворимых минералах и пленках	0,02	1,38
В сульфидах	0,21	14,35
В нерастворимых в царской водке минералах и кварце	0,05	3,68
Итого	1,53	100

В результате фазового анализа установлено, что начальное содержание свободного золота в пробе руды при исходной крупности -2 мм составляет 5,37 %. При уменьшении крупности материала до 60 % класса -0,071 мм наблюдается увеличение содержания свободного золота на 21,21 %. Дальнейшее уменьшение размеров до 95 % класса -0,071 мм позволяет дополнительно высвободить 10,20 % благородного металла. Таким образом, общая доля свободного золота с чистой поверхностью при крупности руды 95 % -0,071 мм составляет 36,78 %. В форме открытых сростков с рудными и породообразующими минералами обнаружено 43,81 % металла.

Суммарное количество цианируемого золота в пробе составляет 80,59 %. На долю упорного, не извлекаемого прямым цианированием золота приходится 19,41 % от общей массы металла. Основной причиной упорности к цианистому процессу является золото, ассоциированное с сульфидами – 14,35 %. Количество ценного компонента в кислоторастворимых пленках составляет 1,38 %. Содержание благородного металла в кварце и других не растворимых в царской водке минералах составляет 3,68 %.

Согласно результатам фазового анализа, проба руды является перспективным сырьем для обработки гравитационными и флотационными методами, а также для цианидного процесса. Однако возможны трудности при

извлечении упорных форм золота, включая сульфиды.

Важно отметить, что результаты фазового анализа не могут быть непосредственно использованы в качестве технологических показателей для обработки руды. Условия амальгамации и выщелачивания (с сорбентом) при фазовом анализе сложно воспроизвести в реальных условиях производства. Поэтому результаты фазового анализа требуют проверки с помощью технологических тестов.

Выводы. Основная часть материала пробы руды с крупностью -2 мм сосредоточена в крупных классах размеров в интервале -2+0,5 мм. В остальных классах крупности материал равномерно распределяется с незначительными изменениями выхода.

Содержание золота в пробе руды, согласно гранулометрическому анализу, колеблется от 0,98 до 4,60 г/т, с общим значением 1,53 г/т. Большая часть золота концентрируется в тонких классах размеров, начиная с класса крупности -0,2+0 мм.

Химический состав пробы руды в основном состоит из литофильных компонентов, главным из которых является кремнезем с содержанием 74,4 %. Суммарное количество оксидов щелочных и щелочноземельных металлов составляет 10,45 %. Количество углерода в пробе составляет 1,20 %, преимущественно в виде карбонатов.

Рудообразующие элементы, в основном железо и сера, присутствуют в пробе руды. Количество железа составляет 3,20 %, с массовой долей сульфидного и окисленного железа 1,63 % и 1,57 % соответственно. Доля серы составляет 1,65 %, вся сера входит в состав сульфидов.

Количество цветных металлов и вредных примесей в пробе не превышает сотых и тысячных долей процента, что не оказывает влияния на технологические процессы при переработке руды.

Единственным ценным компонентом в пробе руды является золото, содержание которого составляет 1,58 г/т, а содержание серебра - менее 0,5 г/т.

В результате фазового анализа выявлено, что общая доля свободного золота с чистой поверхностью при крупности руды 95 % -0,071 мм составляет 36,78 %. Золото в виде открытых сростков с рудными и порообразующими минералами составляет 43,81 % от общего количества. Суммарное количество цианируемого золота в пробе составляет 80,59 %, а упорного золота, не извлекаемого прямым цианированием, - 19,41 %.

Проба руды является перспективным сырьем для переработки гравитационными и флотационными методами, а также для цианидного процесса, согласно результатам изучения ее вещественного состава.

## 2.4 Исследование руды на обогатимость гравитационными методами

Для предварительной оценки потенциала извлечения золота в гравитационный концентрат был проведен тест на центробежном концентраторе с периодической разгрузкой. Затем, с целью подготовки материала для дальнейших исследований, хвосты гравитационного обогащения были обработаны на центробежном концентраторе КС-МДЗ после измельчения навески руды. Полученные продукты были направлены на исследования, включая флотацию и выщелачивание.

На стадии исследований по обогащению пробы руды гравитационными методами были проведены следующие тесты:

Тестирование с целью предварительной оценки технологических свойств.

Наработка продуктов для дальнейших исследований по флотации и выщелачиванию.

Для предварительной оценки уровня извлечения золота в гравитационный концентрат при обогащении руды был проведен тест на центробежном концентраторе с периодической разгрузкой на руде, измельченной до крупности около 80 %  $-0,071$  мм. Принципиальная схема теста представлена на рисунке 5. Результаты тестирования пробы руды приведены в таблице 9.

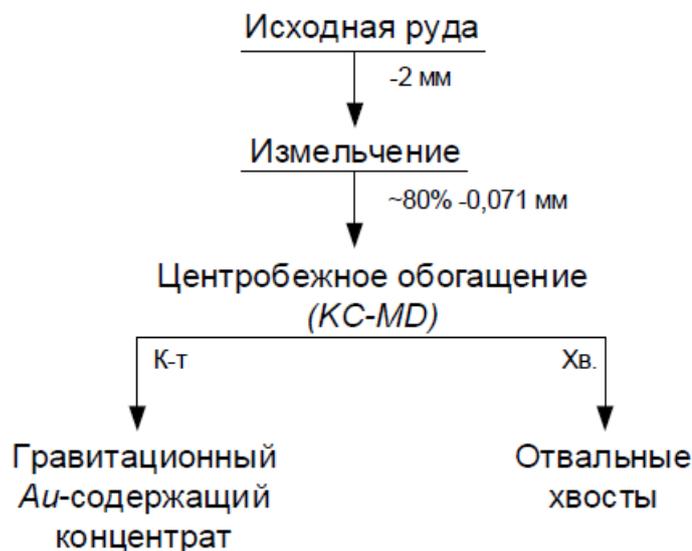


Рисунок 5 – Схема тестирования руды на центробежном концентраторе

Таблица 9 – Результаты технологического тестирования измельченной пробы исходной руды на центробежном концентраторе КС-МДЗ

Продукт	$\gamma$ , %;	$\alpha$ , %;	$\varepsilon$ , %;
Измельчение до ~80% -0,071 мм. Обогащение на центробежном концентраторе КСМДЗ			
Концентрат	0,93	56,20	34,18
Хвосты	99,07	1,04	65,82
Исходная руда	100,00	1,53	100,00

В процессе тестирования образца обнаружено, что выход концентрата составил 0,93 %, при содержании золота в нем 56,2 г/т и извлечении золота на уровне 34,18 %. Параллельно, выход хвостов составил 99,07 %, содержащих 1,04 г золота на каждую тонну исходного материала, с извлечением золота в размере 65,82 %. Содержание золота в исходной пробе оценено в 1,53 г/т.

## **2.5 Исследование обогащения хвостов гравитационного обогащения методами флотации**

Исследования обогащения руды методами флотации после гравитационного обогащения (включая центробежную сепарацию) проводились с целью определения оптимальных параметров флотации для получения сульфидного золотосодержащего концентрата. Основные параметры, включая крупность измельчения, реагентный режим, содержание твердых частиц в пульпе, продолжительность флотации и структуру флотационной схемы, были рассмотрены.

Проведение открытых и замкнутых тестов по флотации в выбранном оптимальном режиме позволило установить показатели обогащения руды.

### **2.5.1 Измельчаемость хвостов гравитационного обогащения**

Исходная крупность хвостов гравитационного обогащения составляет 60,5 %, -0,071 мм. Гранулометрический состав хвостов гравитации для тестов по флотации представлен в таблице 8.

Для определения измельчаемости хвостов центробежной сепарации был построен график зависимости крупности продукта от продолжительности измельчения в лабораторной шаровой мельнице (см. рисунок 6).

Параметры шаровой мельницы:

Объем: 5 л;

Масса шаров для измельчения (низкоуглеродистая сталь): 7 кг;

Стандартная масса загрузки: 1 кг;

Добавляемая вода: 500 мл;

Контролируемый параметр: содержание частиц класса -0,071 мм.

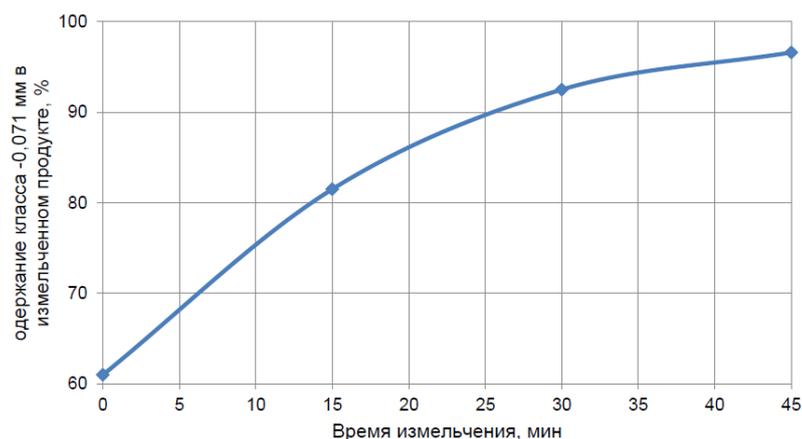


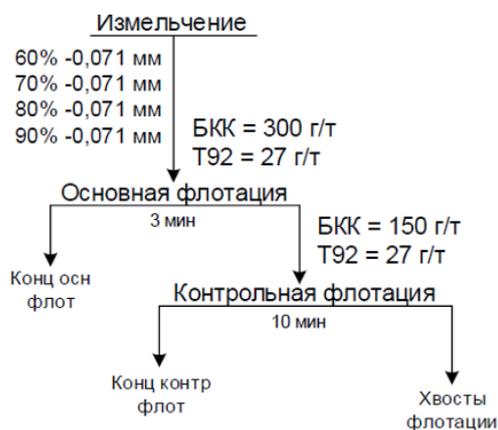
Рисунок 6 – График измельчаемости хвостов гравитационного обогащения руды в лабораторной шаровой мельнице

### 2.5.2 Определение оптимальной крупности измельчения хвостов гравитационного обогащения для флотации

Для определения наиболее эффективной степени измельчения хвостов гравитационного обогащения перед флотацией была проведена серия тестов на материале с крупностью 60 %, 70 %, 80 % и 90 % -0,071 мм. В этих тестах осуществлялись операции основной и контрольной флотации.

Реагентный режим для пробы хвостов включал расход бутилового ксантогената калия (БКК) в основную флотацию – 300 г/т и в контрольную – 150 г/т. В качестве пенообразователя использовался Оксаль Т-92 при расходе 27 г/т как в основной, так и в контрольной операции. Продолжительность флотации определялась визуально по загрузенности пенного слоя и составляла 3 минуты для основной операции и 10 минут для контрольной.

Схема выполнения флотации представлена на рисунке 7, а результаты тестов сведены в таблице 10.



**Рисунок 7 – Схема выполнения тестов по выбору оптимальной крупности измельчения хвостов гравитационного обогащения**

**Таблица 10 – Результаты тестов по определению оптимальной крупности измельчения хвостов гравитационного обогащения для флотации**

Кр.	Продукт	γ, %;	Содержание, %			Извлечение, %			η
			Au, г/т	Fe	S	Au	Fe	S	
60%, 0,071 мм	Концентрат основной флотации	7,9	16,3	17,3	17,4	89,32	40,93	81,23	-
	Концентрат контрольный флотации	6,91	1	3,9	2,16	4,51	8,06	8,81	-
	Итого концентрат флотации	14,81	9,16	11,1	10,3	90,47	49,00	90,04	75,66
	Хвосты флотации	85,19	0,20	2	0,2	9,53	51,00	9,96	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,34	1,69	100	100	100	-
70%, 0,071 мм	Концентрат основной флотации	8,06	16,5	17,1	16,8	85,33	40,49	80,67	-
	Концентрат контрольный флотации	6,86	1,02	3,84	2,2	6,41	7,74	8,99	-
	Итого концентрат флотации	14,91	9,39	11	1,1	91,74	48,23	89,65	76,83
	Хвосты флотации	85,09	0,15	2,07	0,2	8,26	51,77	10,35	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,4	1,68	100	100	100	-
80%, 0,071 мм	Концентрат основной флотации	8,5	16,5	15,5	15,2	85,11	41,09	81,20	-
	Концентрат контрольный флотации	6,5	1,02	3,95	2,13	6,90	7,88	8,57	-
	Итого концентрат флотации	15	9,79	10,5	9,6	92,01	48,98	89,77	76,15
	Хвосты флотации	85	0,073	2,07	0,21	7,99	51,02	10,23	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,41	1,69	100	100	100	-
90%, 0,071 мм	Концентрат основной флотации	8,12	15	17	16,6	84,36	38,90	76,26	-
	Концентрат контрольный флотации	8,37	1,5	4,66	2,85	8,32	10,99	13,49	-
	Итого концентрат флотации	16,49	8,147	10,7	9,62	92,67	49,89	89,75	76,18
	Хвосты флотации	83,51	0,22	2,13	0,22	7,33	50,11	10,25	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,55	1,77	100	100	100	-

Из анализа графика на рисунке 7 следует, что наивысший показатель эффективности обогащения достигается при крупности измельчения хвостов гравитационного обогащения на уровне 80 % класса -0,071 мм. Более тонкое измельчение приводит к незначительному увеличению извлечения золота, всего на 0,93 %, при этом выход черного концентрата увеличивается лишь на 1,58 %. На основании полученных данных было принято решение о выборе оптимальной крупности измельчения для флотации, которая составляет 80 % -0,071 мм.

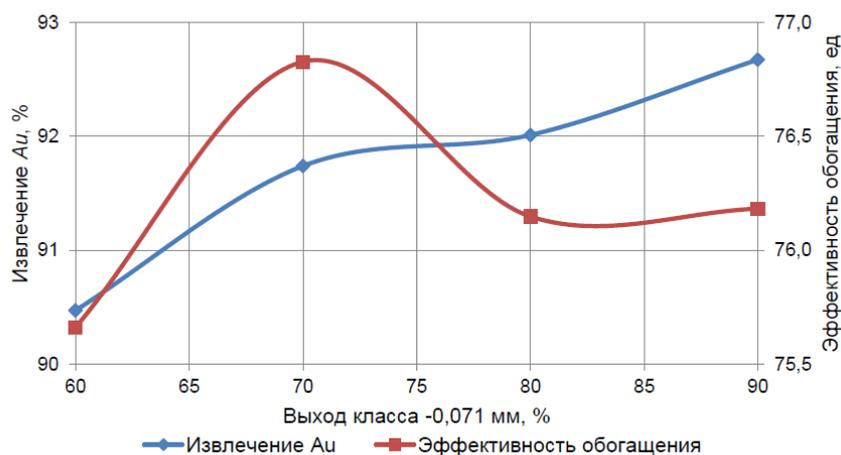


Рисунок 7 – График зависимости извлечения золота и эффективности обогащения от крупности измельчения хвостов гравитации

### 2.5.3 Выбор оптимального расхода собирателя для флотации хвостов гравитационного обогащения руды

В контексте обогащения руды, ценным компонентом является золото. Поэтому для сбора сульфидов и золота в процессе флотации был проверен бутиловый ксантогенат калия (БКК), который является наиболее распространенным и эффективным реагентом.

В процессе тестирования проводились операции основной и контрольной флотации. В качестве пенообразователя использовался Оксаль Т92 с расходом 27 г/т как в основной, так и в контрольной операции. Расход собирателя (суммарный в обе операции) варьировался от 75 до 450 г/т. Результаты этих тестов приведены в таблице 10, а схема их выполнения показана на рисунке 8.

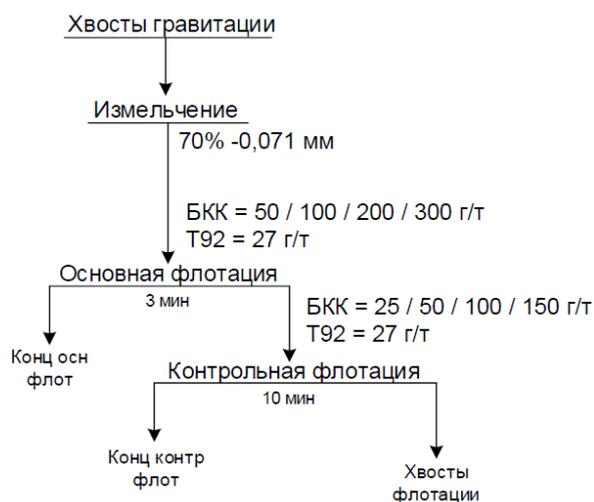


Рисунок 8 – Схема выполнения тестов по выбору оптимального расхода БКК для флотации хвостов гравитационного обогащения руды

Таблица 11 – Влияние расхода бутилового ксантогената калия на результаты флотационного обогащения

БКК	Продукт	γ, %;	Содержание, %			Извлечение, %			Н
			Au, г/т	Fe	S	A	Fe	S	
50+25	Концентрат основной флотации	6,77	15	19,4	18	66,37	37,28	69,73	-
	Концентрат контрол. флотации	7,84	1,84	5,96	4,34	9,43	13,26	19,47	-
	Итого концентрат флотации	14,6	7,94	12,2	10,7	75,78	50,54	89,2	74,28
	Хвосты флотации	85,4	0,43	2,04	0,22	24,22	49,46	10,8	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,52	1,75	100,00	100	100	-
100+50	Концентрат основной флотации	8,63	14	15,3	13,3	78,97	39,39	73,65	-
	Концентрат контрол. флотации	6,47	1,87	5,93	4,02	7,91	11,46	16,7	-
	Итого концентрат флотации	15,1	8,8	11,3	9,3	86,85	50,85	90,35	74,66
	Хвосты флотации	84,9	0,238	1,94	0,18	13,21	49,15	9,65	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,35	1,56	100	100	100	-
200+100	Концентрат основной флотации	8,94	15,1	13,5	11,8	88,23	40,61	73,74	-
	Концентрат контрол. флотации	5,92	1,02	5,28	3,75	3,95	11,07	16,33	-
	Итого концентрат флотации	14,86	9,49	10,1	8,5	92,17	51,68	90,07	74,91
	Хвосты флотации	85,14	0,14	1,92	0,19	7,79	48,32	9,93	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,3	1,59	100	100	100	-

Продолжение 11 таблицы

БКК	Продукт	$\gamma$ , %;	Содержание			Извлечение			Н
			Au, г/т;	Fe, %;	S, %;	Au, %;	Fe, %;	S, %;	
300+150	Концентрат основной флотации	9,57	12	10,8	8,9	75,06	33,34	63,64	-
	Концентрат контрольный флотации	7,42	3,5	6,25	4,65	16,97	14,96	25,67	-
	Итого концентрат флотации	16,98	8,29	8,8	7,07	92,00	48,3	89,31	74,9
	Хвосты флотации	83,02	0,147	1,93	0,17	7,98	51,7	10,69	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,1	1,34	100	100	100	-

В каждом эксперименте для оценки результатов флотации было вычислено значение критерия Хенкока, отражающего эффективность протекания флотационного процесса. Далее были построены графики зависимости этого показателя и извлечения золота в концентрат от расхода собирателя (рисунок 9).

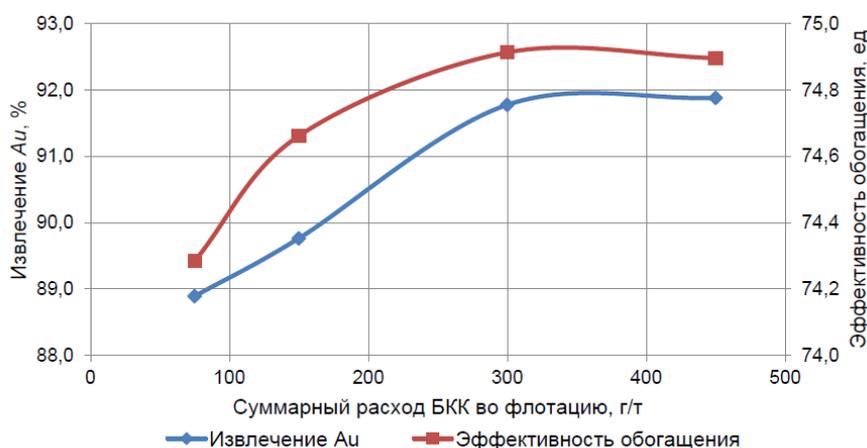


Рисунок 9 – Влияние расхода бутилового ксантогената калия на извлечение золота и показатель эффективности флотации

Результаты тестирования показали, что минимальное содержание золота в отвалах флотации составило 0,014 г/т. Максимальная эффективность обогащения достигается при расходе БКК в объеме (200+100) – 95,96 единиц. Для последующих исследований было принято оптимальное значение расхода БКК, равное (200+100) г/т.

#### 2.5.4 Выбор оптимальной плотности пульпы для флотации

Для определения оптимальной плотности пульпы в флотации отвалов гравитационного обогащения была проведена серия тестов с различным содержанием твердых веществ в пульпе: 20 %, 27 %, 35 % и 40 % (по массе). Размер фракции хвостов гравитационного обогащения для флотации

составлял 70 %, -0,071 мм. В каждом тесте осуществлялись основная и контрольная флотация. Схематическое изображение процесса флотации представлено на рисунке 10. Результаты тестов приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Влияние содержания твердого в пульпе на показатели флотации хвостов гравитационного обогащения

ρ, %	Продукт	γ, %	Содержание, %			Извлечение, %			η
			Au, г/т	Fe	S	A	F	S	
20	Концентрат основной флотации	5,57	14,30	22,00	23,80	78,81	37,13	76,7	-
	Концентрат контрол. флотации	7,86	1,17	4,25	2,65	9,10	10,12	11,95	-
	Итого концентрат флотации	13,42	6,61	11,60	11,40	87,91	47,25	88,02	74,49
	Хвосты флотации	86,58	0,14	2,01	0,24	12,09	52,75	11,98	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,30	1,74	100	100	100	-
27	Концентрат основной флотации	7,97	11,40	16,90	16,30	83,66	39,55	78,47	-
	Концентрат контрол. флотации	7,14	0,94	4,21	2,40	6,18	8,83	10,35	-
	Итого концентрат флотации	15,11	6,46	10,90	9,70	89,84	48,38	88,82	74,73
	Хвосты флотации	84,89	0,13	2,07	0,22	10,16	51,62	11,18	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,40	1,66	100	100	100	-
35	Концентрат основной флотации	8,77	10,60	16,80	16,20	83,74	43,93	81,88	-
	Концентрат контрол. флотации	6,44	1,05	3,92	2,26	6,09	7,53	8,39	-
	Итого концентрат флотации	15,21	6,56	11,30	10,30	89,84	51,46	90,27	74,63
	Хвосты флотации	84,79	0,133	1,92	0,20	10,16	48,54	9,73	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,35	1,73	100	100	100	-
40	Концентрат основной флотации	8,06	10,20	16,10	16,00	82,55	40,29	78,62	-
	Концентрат контрольный флотации	8,24	0,92	3,73	2,05	7,61	9,54	10,30	-
	Итого концентрат флотации	16,30	5,51	9,80	8,95	90,16	49,83	88,92	73,87
	Хвосты флотации	83,70	0,12	1,93	0,22	9,84	50,17	11,08	-
	Исходная навеска	100	1,53	3,22	1,64	100	100	100	-

На основе результатов проведенных тестов был построен график, отражающий зависимость извлечения золота и критерия эффективности от содержания твердого вещества в пульпе для флотации. График представлен на рисунке 10.

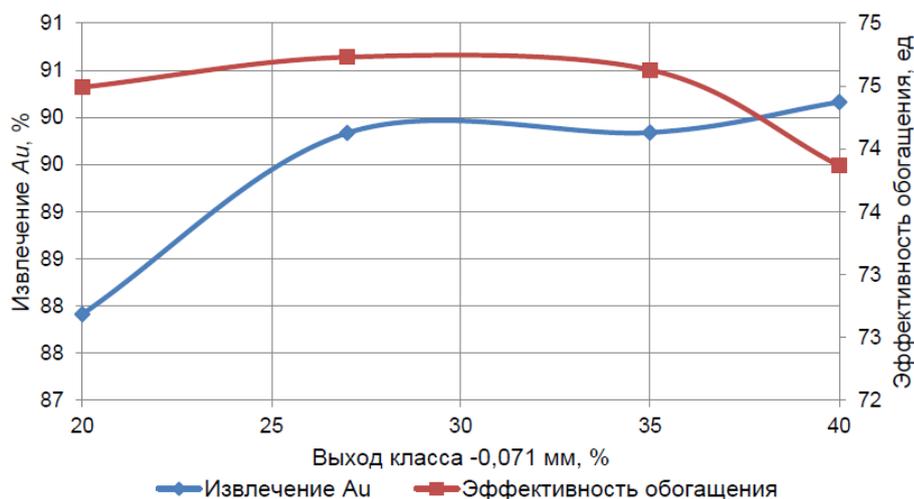


Рисунок 10 – Зависимость извлечения золота от выхода чернового концентрата флотации при различной плотности пульпы

На основании результатов данной серии тестов можно сделать следующие выводы:

- уменьшение плотности пульпы с 27 % до 20 % приводит к снижению выхода чернового концентрата на 1,68 % и улучшению его качества при небольшом снижении уровня извлечения золота на 1,92 %;

- увеличение плотности пульпы до 35 % практически не влияет на процесс флотации, но дальнейшее увеличение плотности до 40 % приводит к повышению извлечения золота в черновой концентрат на 0,33 %, при этом его выход увеличивается на 1,19 %.

Максимальное значение критерия эффективности обогащения (74,73) достигается при содержании твердого вещества в пульпе 27 %. Следовательно, для флотации отвалов гравитационного обогащения руды оптимальным является содержание твердого вещества в пульпе от 27 % до 35 % (по массе).

### 2.5.5 Замкнутый опыт флотационного обогащения

Для определения параметров гравитационно-флотационного обогащения руды был проведен тест, включающий выполнение флотации в замкнутом цикле. Схема теста показана на рисунке 11.

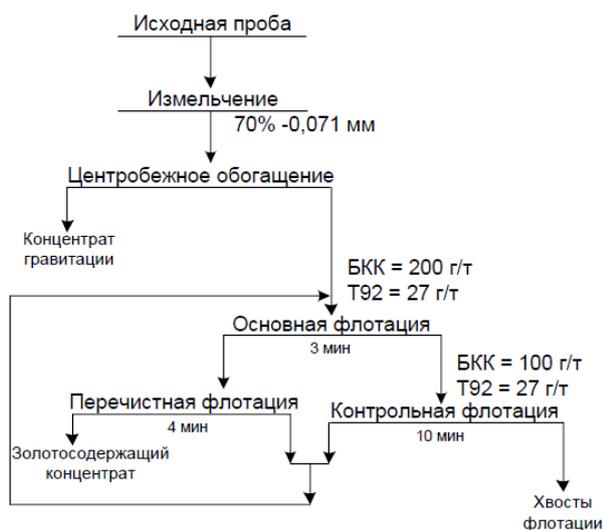


Рисунок 11 – Схема гравитационно-флотационного обогащения руды

Гравитационную и флотационную обработки проводили с использованием руды, измельченной до размера 80 %, -0,071 мм. Концентрат из контрольной флотации сливался с отвалами после перечистой операции и направлялся обратно в основной цикл флотации. Результаты данного теста приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты гравитационно-флотационного обогащения руды

Продукт	$\gamma$ , %	$\alpha$ , Au, г/т	$\varepsilon$ , %
Гравитационный концентрат	0,028	856	17,36
Флотационный концентрат	5,63	18,30	74,64
Сумарный концентрат	5,66	22,45	92,00
Хвосты флотации	94,34	0,12	8,00
Исходная руда	100	1,58	100

В результате замкнутого теста были получены следующие продукты:

Гравитационный концентрат с содержанием золота 856,0 г/т, при выходе 0,028 % и извлечении 17,36 %.

Сульфидный концентрат флотации с содержанием золота 18,3 г/т, при извлечении 74,64 % и выходе 5,63 %.

Суммарное извлечение золота в гравитационно-флотационный концентрат составило 92,00 %, при выходе 5,658 % и расчетном содержании золота 22,45 г/т. Содержание золота в хвостах флотации составило 0,117 г/т.

По результатам замкнутого теста было установлено, что применение перечистой операции позволяет существенно сократить выход концентрата флотации (на 3,74 %) при сопоставимом уровне извлечения золота. При этом содержание золота во флотоконцентрате увеличилось в 1,8 раза (с 10,3 до 18,3

г/т). Таким образом, выполнение перечистой операции при флотации руды является целесообразным.

В целом, результаты выполненного теста достаточно высоки. Следовательно, данная схема может быть рекомендована для обогащения руды.

### **2.5.6 Гидрометаллургические исследования**

Исходная проба дробленной руды была подвергнута тестам гравитационного и флотационного методов обогащения. На образцах хвостов обогащения проведены тесты по цианированию при различной концентрации NaCN, предварительной аэрации пульпы воздухом, а также измерено потребление кислорода. Концентрат флотационного обогащения оказался благоприятным для последующего агитационного цианирования. Извлечение золота из концентрата крупностью P80 71 мкм при цианировании без загрузки сорбента составило 60,89 %, а при сорбционном цианировании - 72,07 %. Измельчение концентрата до P80 10 мкм приводит к дополнительному повышению извлечения золота в сорбционном режиме. Оптимальной крупностью измельчения флотационного концентрата оказалась P80 10 мкм.

Применение атмосферного окисления кислородом не значительно повысило извлечение золота из флотационного концентрата. Оптимальная концентрация NaCN при цианировании флотационного концентрата составила 0,1 %, с расходом 2,3 кг/т. Для стабильного извлечения золота продолжительность цианирования должна составлять не менее 24 часов, при которой извлечение золота достигает 86,59 %. Применение технологии LeachOX для извлечения золота из флотационного концентрата оказалось нецелесообразным.

Тесты по интенсивному цианированию концентрата гравитационного обогащения показали высокую эффективность, с извлечением золота из концентрата в раствор до 98,98 %. Извлечение золота из кека выщелачивания составило 54,02 %, при расходе цианида 3,6 кг/т. Общее извлечение золота из гравитационного концентрата в гидрометаллургическом переделе достигло 99,53 %.

Хвосты флотационного обогащения также благоприятны для агитационного цианирования. Извлечение золота из хвостов составило 91,13 %, а содержание золота в хвостах - 0,13 г/т. При использовании гравитационно-флотационной схемы обогащения наблюдаются значительные преимущества.

Выводы. Руда является подходящим сырьем для гравитационно-флотационного обогащения. Для флотационного обогащения хвостов гравитационного процесса были определены оптимальные условия:

Размер фракции руды составляет 80 % -0,071 мм;

Расход бутилового ксантогената калия в основную флотацию составляет 200 г/т, в контрольную - 100 г/т;

Оптимальное содержание твердых веществ в пульпе - 27-35 %;

Продолжительность основной операции - 3 минуты, контрольной - 10 минут.

В результате замкнутого теста по гравитационно-флотационному обогащению руды по разработанной схеме, включающей основную, контрольную и перечистную операции, при размере фракции руды 80 % -0,071 мм извлечение золота в гравитационно-флотационный концентрат составило 92,00 % при выходе 5,658 % и расчетном содержании золота 22,45 г/т. Содержание золота в хвостах флотации равнялось 0,117 г/т.

В целом, представленные показатели теста являются достаточно высокими. Следовательно, данная схема может быть рекомендована для обогащения руды. Результаты дополнительных исследований гравитационно-флотационной схемы обогащения и наработки продуктов обогащения на укрупненной навеске руды представлены в следующем разделе 3.4,3.5.

### **2.5.7 Лабораторное испытание перспективной гравитационно-флотационно-цианистой схемы переработки руды**

По данным краткого анализа вещественного состава руды выявлено, что она в основном состоит из литофильных компонентов, преимущественно кремнезема, присутствующего в пробе на 74,4 %. Суммарное содержание оксидов щелочных и щелочноземельных металлов составляет 10,45 %, а углерода - 1,20 %, в основном представленного в карбонатах.

Рудообразующие элементы включают железо и серу. Железо составляет 3,20 %, при этом сульфидное и окисленное железо присутствуют в количестве 1,63 % и 1,57 % соответственно. Сера составляет 1,65 % и входит в состав сульфидов.

Фазовый анализ показал, что 36,78 % золота имеет чистую поверхность, а 43,81 % присутствует в виде открытых сростков с минералами. Суммарное количество цианируемого золота составляет 80,59 %, а 19,41 % не извлекаемо прямым цианированием.

Гравитационные тесты показали, что извлечение золота в гравитационный концентрат составило от 19,23 % до 33,60.

По результатам флотационных тестов установлено, что руда представляет собой благоприятное сырье для обогащения данным методом. Были определены следующие оптимальные условия для флотации:

- крупность измельчения составляет 70 % -0,071 мм (P80 - 85 мкм);
- расход бутилового ксантогената калия в основную флотацию составляет 200 г/т, в контрольную – 100 г/т;
- оптимальное содержание твердого в пульпе - 27-35 %;
- продолжительность основной операции 3 мин, контрольной – 10 мин.

На основе результатов предварительных испытаний гравитационными и флотационными методами была разработана перспективная гравитационно-флотационная схема переработки руды, которая представлена на рисунке 12.

Предложенная схема включает в себя следующие этапы обработки руды: Гравитационное обогащение измельченной руды с низким выходом концентрата. Хвосты от гравитационного обогащения подвергаются флотации. Флотация, которая включает основную, контрольную и перечистную операции. Гравитационный концентрат направляется на интенсивное выщелачивание. Флотационный концентрат после ультратонкого измельчения проходит сорбционное цианирование.

Кеки цианирования переходят в отвальные хвосты.

Конечными продуктами данной схемы являются золотосодержащий раствор и отвальные хвосты. Важно отметить, что представленная схема на рисунке 12 является принципиальной и не отражает всех технологических особенностей реального производства.

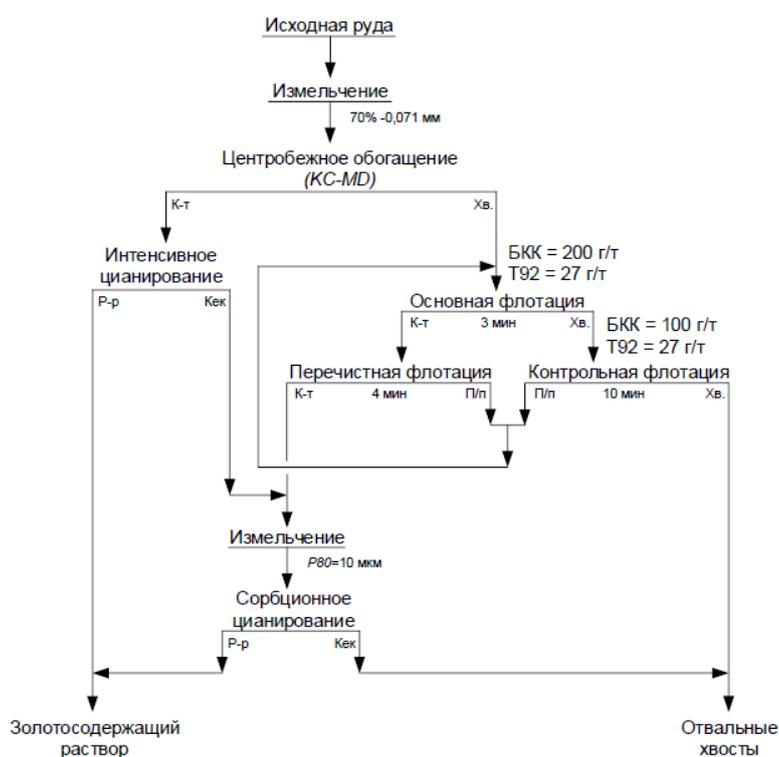


Рисунок 12 – Перспективная гравитационно-флотационно-цианистая схема переработки руды

Для оценки эффективности предложенной схемы переработки руды и получения продуктов обогащения были проведены пилотные испытания на укрупненной навеске руды массой около 390 кг. После проведения испытаний было выполнено краткое изучение вещественного состава продуктов, определены оптимальные параметры и результаты их переработки методом выщелачивания.

В ходе последовательного интенсивного и сорбционного цианирования гравитационного концентрата было достигнуто общее извлечение золота в раствор на уровне 99,53 %.

Также было установлено, что концентрат флотационного обогащения обладает низкой сорбционной активностью и является благоприятным для процесса агитационного цианирования.

Оптимальной крупностью измельчения флотационного концентрата для выщелачивания оказалась P80 10 мкм. Расчетный удельный расход электроэнергии при измельчении концентрата флотации с исходной крупностью 80 % 150 мкм до крупности 80 % 10,1 мкм составил 81,5 кВт·ч/т.

При определении оптимального режима выщелачивания флотоконцентрата было установлено, что необходимая концентрация цианида натрия в растворе составляет 0,1 %, а средний расход цианида натрия при этом составил 2,3 кг/т. Продолжительность цианирования должна быть не менее 24 часов. В этих условиях извлечение золота составило 86,59 % от операции.

Отмечено, что хвосты флотационного обогащения также представляют собой благоприятное сырьё для выщелачивания. Извлечение золота из хвостов флотации с крупностью P80 71 мкм при цианировании составило в среднем 75,38 %. Однако практическая реализация выщелачивания всего объема хвостов с содержанием золота на уровне 0,1 г/т в промышленных условиях не оправдана. Поэтому данная операция не рассматривалась при формировании перспективной схемы.

На основе результатов пилотных испытаний схемы, включающих обогащение укрупненной навески руды и выщелачивание продуктов, был выполнен расчет сквозных показателей. Результаты расчета представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты пилотных испытаний перспективной гравитационно-флотационно-цианистой схемы переработки руды

Продукт	γ, %;	Содержание, %		Извлечение, %;	
		Au, г/т	S	Au	S
Исходная руда	100,00	1,53	1,61	100,00	100,00
Измельчение до 70%-0,071 мм. Обогащение на КС-MD3					
Гравитационный концентрат	0,03	856	-	17,24	-
Хвосты гравитации	99,97	1,14	-	82,76	-
Цианирование гравитационного концентрата					
Извлечение золота	-	-	-	99,53	-
Кек концентрата	0,03	4	0,08	-	-
Флотация на хвостах гравитационного обогащения					
Флотационный концентрат	5,70	17,9	24,5	73,89	86,82
Хвосты флотации	94,27	0,13	0,225	8,87	13,18
Цианирование флотационного концентрата при крупности 80% -10 мкм					
Извлечение золота	-	-	-	86,59	-
Кек концентрата	5,7	2,4	-	13,41	-

*Продолжение 14 таблицы*

Продукт	$\gamma$ , %;	Содержание, %		Извлечение, %;	
		Au, г/т	S	Au	S
Сводные показатели при крупности флотационного концентрата 80% -10 мкм					
Извлечение золота	-	-	-	81,14	-
Отвальные хвосты	-	-	-	18,86	-

Из таблицы 14 видно, что на этапе обогащения исходной руды было достигнуто извлечение золота в гравитационный концентрат на уровне 17,24 %, а в флотационный концентрат - 73,89 %. Общее извлечение в концентраты составило 91,13 %. При этом содержание золота в хвостах обогащения (флотации) составило 0,13 г/т.

При проведении выщелачивания гравитационного и флотационного концентратов было достигнуто суммарное сквозное извлечение золота в раствор на уровне 81,14 % (без учета потерь с сорбентом и жидкой фазой). Содержание золота в общих отвальных хвостах схемы, включая кеки выщелачивания, составило 0,26 г/т.

### 3 Нарботка флотационного концентрата на полупромышленной установке

Для продолжения исследовательских работ и оценки эффективности процессов было принято решение установить пилотную установку рисунок 13,14. Это позволит провести полупромышленные тесты в более реалистичных условиях. Полупромышленная установка включает следующие технологические операции:

- измельчение;
- классификация;
- агитация слива классификатора;
- флотация;

Этот шаг позволит более точно оценить потенциал перспективных технологических решений перед их масштабированием на полную производственную мощность.

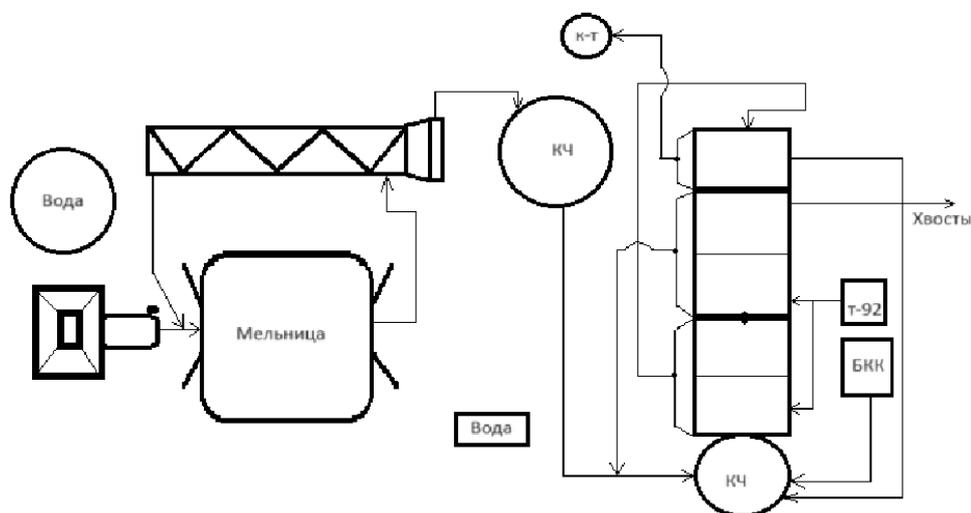


Рисунок 13 – Схема цепи аппаратов полупромышленной установки



Рисунок 14 – Снимки полупромышленной установки

Пилотные установки могут быть полезны для определения реагентного режима фабрики и для создания геологических карт, в промышленности пилотные установки используются для тестирования новых процессов или материалов, а также для оптимизации существующих процессов производства. Их данные могут помочь определить эффективность использования реагентов в производственных процессах.

Что касается создания геологических карт, то пилотные установки могут использоваться для сбора данных о горных породах, других геологических параметрах. Эти данные могут быть важными для определения месторождений полезных ископаемых или для планирования геологических исследований.



Рисунок 15 – Упрощенная технологическая схема с минимальным выходом концентрата

Таблица 15 – Реагентная схема

Операции	Время Агитации (мин)	pH	PBX (г/т)	T-92 (г/т)	Время Флот (мин)
Основная флотация 1	5		100	25	4
Основная флотация 2			100	20	7
Контрольная флотация 1			50	20	6
Контрольная флотация 2			50	20	6
Перечистная флотация					5

Таблица 16 – Результаты полученных с пилотной установкой

Продукт	Выход		Золота		S сульфидная	
	(кг)	(%)	$\alpha$ , г/т;	$\epsilon$ , %;	$\alpha$ , %;	$\epsilon$ , %;
Концентрат	770,4	6,50	21,7	92,06	21,20	66,57
Хвосты	11081,9	93,50	0,13	7,94	0,74	33,43
Итого	11852,3	100,00	1,53	100,00		100,00

Проведено исследование процесса флотации золотосодержащего концентрата на полупромышленной установке. В результате были получены данные о наработке флотационного концентрата, его массе, выходе и содержании золота. Целью данного исследования было оценить эффективность процесса флотации и определить параметры концентрата.

Нарботка флотационного концентрата на полупромышленной установке составила 770,4 кг. Выход концентрата составил 6,5 %, что говорит о том, что процесс флотации эффективен, поскольку удалось выделить значительную долю концентрата из сырья. Содержание золота в полученном концентрате составило 21,7 г/т, что указывает на высокую концентрацию драгоценного металла в конечном продукте.

Извлечение золота в процессе флотации составило 92,06 %. Этот показатель является важным, поскольку оценивает эффективность процесса по извлечению золота из сырья. Высокий процент извлечения свидетельствует о том, что процесс флотации успешно разделил золото от других компонентов руды.

Исследование показало, что процесс флотации на полупромышленной установке эффективен и позволяет получать концентрат с высоким содержанием золота. Полученные результаты свидетельствуют о потенциале данного метода обогащения руды для дальнейшего использования в производстве золота.

На основе полученных результатов рекомендуется продолжить исследования с целью оптимизации процесса флотации. Возможно, внесение

корректив в технологические параметры позволит дополнительно увеличить выход концентрата и извлечение золота, что повысит эффективность производства и экономическую выгоду. Также рекомендуется провести более детальный анализ качества полученного концентрата с целью определения его пригодности для дальнейшей переработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Гранулометрический анализ пробы показал, что основная масса материала сосредоточена в крупных классах в интервале от -2 до +0,5 мм. В других классах крупности материал распределяется равномерно с незначительными вариациями выхода.

2 Содержание золота в пробе варьируется от 0,98 до 4,60 г/т в зависимости от класса крупности, при этом основная масса золота концентрируется в тонких классах, начиная с -0,2+0 мм.

3 Химический состав пробы руды главным образом представлен литофильными компонентами, преобладает кремнезем с содержанием 74,4%. В пробе также присутствуют оксиды щелочных и щелочноземельных металлов (10,45%) и углерод (1,20%).

4 Рудообразующие элементы в основном состоят из железа (3,20%) и серы (1,65%), при этом большая часть серы входит в состав сульфидов.

5 Количество цветных металлов и вредных примесей в пробе незначительно и не окажет влияния на технологические процессы при переработке руды.

6 Основным ценным компонентом в пробе является золото с содержанием 1,38 г/т, содержание серебра менее 0,5 г/т.

7 Фазовый анализ показал, что большая часть свободного золота находится в тонких классах крупности, суммарное количество цианируемого золота составляет 80,59%. Гравитационные тесты показали невысокое извлечение золота (19,23-33,60%) и рекомендуют гравитационно-флотационное обогащение.

8 В лабораторных условиях разработана комбинированная гравитационно-флотационная схема с цианированием полученных концентратов. По разработанной схеме общее извлечение золота в концентраты составило 91,13%. При этом содержание золота в хвостах обогащения (флотации) составило 0,13 г/т.

9 При переработке 2 тонн руды на полупромышленной установке извлечение золота во флотоконцентрат составило 92,06 %.

**Оценка полноты решений поставленных задач.** В данном исследовании были успешно достигнуты поставленные задачи. В первую очередь были изучены гранулометрические характеристики исходного сырья, что позволило получить полное представление о его составе и структуре. Затем были проведены опыты по обогащению золотосодержащих руд, в результате чего были получены концентраты, соответствующие требуемому качеству.

Особое внимание было уделено исследованию целесообразности применения гравитационно-флотационного цианирования, что позволило выявить эффективные методы обогащения золотосодержащего сырья. На основе проведенных исследований была разработана технологическая схема обогащения золотосодержащей руды, учитывающая оптимальные параметры

процессов и обеспечивающая высокое качество получаемых концентратов.

**Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию полученных результатов.** Полученные результаты позволяют сделать вывод о применимости разработанной технологической схемы обогащения не только для руд с высоким содержанием золота, но и для переработки сырья с более низкими его содержаниями. Это свидетельствует о эффективности и универсальности предложенного подхода, который может быть успешно адаптирован к различным условиям и типам рудопромышленных месторождений. Таким образом, разработанная технологическая схема представляет собой перспективное решение для промышленной переработки разнообразного ассортимента золотосодержащего сырья.

**Оценка технико-экономической эффективности внедрения.** Из проведенных исследований делается вывод о потенциально высокой эффективности внедрения разработанной технологической схемы. Это объясняется использованием экономически выгодных методов и оборудования в процессе исследований. Одним из ключевых экономически выгодных аспектов является применение флотации, что позволяет избежать энергоемких процессов, требующих значительных финансовых вложений. Тем не менее, более точные оценки технико-экономической эффективности будут доступны после внедрения технологической схемы на производственном уровне, когда будут учтены реальные данные и результаты эксплуатации.

**Оценка научно-технического уровня выполненной работы.** Эта научно-исследовательская работа достигла высокого уровня и представляет собой одно из лучших достижений в области переработки золотосодержащего сырья. Разработанная технологическая схема обогащения золотосодержащей руды, основанная на результатах этого исследования, отличается простотой в исполнении и экономичностью. Это позволяет эффективно использовать золотосодержащую руду с более низким содержанием золота, что является значимым достижением в области промышленной переработки руды.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Котельников, И. В. Промышленная химия золота. Москва: ЛАНЬ, 2015. - 200 с.
- 2 Шафрановский, И. И. Технология и оборудование для переработки золотосодержащих руд. Москва: Недра-Бизнесцентр, 2018. - 180 с.
- 3 Кузнецов, В. И. Золотоносные россыпи: формирование, разведка, добыча. Москва: Горный мир, 2019. - 250 с.
- 4 Петров, П. П., и др. Методы анализа золотосодержащих руд и концентратов. Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ, 2017. - 150 с.
- 5 Лисовский, А. А. Золотоносные руды: генезис, строение, разведка. Москва: Горный мир, 2016. - 220 с.
- 6 Карпенко, Н. И. Экономика и управление добычей золота. Москва: Логос, 2017. - 190 с.
- 7 Герасимов, А. В. Экологические аспекты добычи и переработки золота. Москва: Экология, 2018. - 210 с.
- 8 Рейдель, Стефан П. Обработка золотосодержащих руд: Проектная разработка и эксплуатация. Москва: Издательский дом "Флинта", 2017. - 240 с.
- 9 Пираджно, Франко. Золотые месторождения: Геологическая классификация и экономическое значение. Санкт-Петербург: Издательство "Недра", 2017. - 180 с.
- 10 Лесникова, В. П., и др. Обогащение золотосодержащих руд. Москва: Наука, 2017. - 200 с.
- 11 Хрущев, В. А. Технология производства золота и серебра. Москва: Наука, 2015. - 170 с.
- 12 Технология добычи золота. Под ред. П. В. Волкова. Москва: Интернет Инжиниринг, 2016. - 160 с.
- 13 Золотоносные месторождения: разведка и геология. Под ред. А. И. Войткова. Москва: Недра, 2015. - 190 с.
- 14 Обработка золотосодержащих руд: технологии и методы. Под ред. А. В. Сафонова. Москва: Горный мир, 2016. - 180 с.
- 15 Экономика добычи и переработки золота. Под ред. В. В. Сергеева. Москва: Экономика, 2018. - 210 с.
- 16 Золотоносные россыпи и месторождения: геология и промышленность. Под ред. И. Н. Лаппо. Москва: Наука, 2017. - 220 с.
- 17 Анализ и оценка золотосодержащих руд. Под ред. Е. И. Михайлова. Москва: Логос, 2016. - 200 с.
- 18 Методы добычи золота: современные технологии. Под ред. Н. Г. Потапова. Москва: Недра, 2019. - 230 с.
- 19 Экологически безопасная добыча золота: практика и перспективы. Под ред. А. А. Никитина. Москва: Экология, 2015. - 180 с.
- 20 Прогнозирование и планирование добычи золота. Под ред. С. В. Родионова. Москва: Издательский дом МАИ, 2015. - 170 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Список опубликованных работ**

1. Е.Н. Базар, И.Ю.Мотовилов Исследование гравитационно – флотационной обогатимости золотосодержащей руды / Сборник трудов Международной научно-практической конференции /«ресурсосберегающие технологии в минерально - индустриальном мегакомплексе в условиях устойчивого развития экономики» 14-15 марта 2024 / С. 399 - 403

---

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**



Ө.А.Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты  
Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова

**«ЭКОНОМИКАНЫҢ ТҰРАҚТЫ ДАМУЫ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ  
МИНЕРАЛДЫҚ-ИНДУСТРИЯЛЫҚ МЕГАКЕШЕНДЕГІ  
РЕСУРС ҮНЕМДЕУШІ ТЕХНОЛОГИЯЛАР»  
Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциясының  
ЕНБЕКТЕР ЖИНАҒЫ  
14-15 наурыз 2024**

**СБОРНИК ТРУДОВ  
Международной научно-практической конференции  
«РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В МИНЕРАЛЬНО-ИНДУСТРИАЛЬНОМ МЕГАКОМПЛЕКСЕ  
В УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ»  
14-15 марта 2024**

**PROCEEDINGS  
International Scientific and Practical Conference  
«RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES  
IN THE MINERAL-INDUSTRIAL MEGA-COMPLEX  
IN CONDITIONS OF SUSTAINABLE ECONOMY DEVELOPMENT»  
14-15 of March, 2024**

Алматы 2024

При сравнение получаемых технологических показателей флотации золото-медной руды месторождения «Кокташжал» установлено, что при использовании собирателей АмилКс и ТС-1000 извлечение и качество золото-медного концентрата выше чем при использовании БКс, при этом, в сравнении с оптимальным расходом базового собирателя бутилового ксантогената натрия расход амилового ксантогената уменьшается со 100 до 60 г/т, ТС-1000 со 100 до 30 г/т.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения [Текст]: учеб. для вузов / А.А. Абрамов. – М.: Горная книга, 2016. – 595 с.
- 2 Hosseini S. Физико-химические исследования флотации медных минералов [Текст]: учеб. для вузов / Hosseini S. – 2018. – 228 с.
- 3 Определение флотореагентов и их классификация [Электронный ресурс]. [https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00429984\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00429984_0.html) (дата обращения 27.07.2020).
- 4 Луи Г. Исследование селективности собирателей при флотации сульфидов меди [Текст] / Г. Луи, Х. Чжун, Т. Дай // Минеральные и металлургические труды. - 2018. - Том. 25 - № 1. - С. 19-24.
- 5 Мелик-Гайказян В.И., Ворончихина В.В., Емельянова Н.П., Драганов А.В., Ермаков К.Г. Основная характеристика флотационной активности аполиарных реагентов [Текст] / В.И. Мелик-Гайказян, В.В. Ворончихина, Н.П. Емельянова, А.В. Драганов, К.Г. Ермаков // Цветная металлургия. - 2016. - №4. - С. 68-71.
- 6 Бектурганов Н.С., Тусупбаев Н.К., Семушкина Л.В., Калиева Р.С. Флотационные реагенты в процессах обогащения минерального сырья [Текст] / Н.С. Бектурганов, Н.К. Тусупбаев, Л.В. Семушкина, Р.С. Калиева // Цветные металлы. - 2019. - №4. - С. 48-51.
- 7 Gupta, A., Yan, D., Проектирование и производство по переработке полезных ископаемых [Текст] / Gupta, A., Yan, D. // Введение, 2-е изд., Elsevier, Amsterdam. – 2018. - С. 2-3.
- 8 Голиков В.В. Испытание и применение эффективных собирателей при флотации руд, содержащих золото и серебро [Текст] / В.В. Голиков // Обогащение руд. – 2018. – №3. – С. 15-21.
- 9 Кондратьев С.А. Оценка флотационной активности реагентов-собирателей [Текст] / С. А. Кондратьев // Обогащение руд. - 2020. - № 4. - С. 24-30.
- 10 Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Милович Ф.О., Иванова П.Г., Хачатрян Л.С. Селективное повышение флотоактивности сульфидов цветных металлов с использованием сочетаний сульфгидрильных собирателей [Текст] / В. А. Игнаткина, В.А. Бочаров, Ф. О. Милович, П. Г. Иванова, Л. С. Хачатрян // Обогащение руд. - 2016. - №3. - С. 18-24.

УДК 622.7

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННО – ФЛОТАЦИОННОЙ ОБОГАТИМОСТИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ

Е.Н. Базар, И.Ю. Мотовилов  
*Satbayev University, г. Алматы, Казахстан*

В настоящее время мировая золотодобывающая отрасль в связи с истощением ресурсов легкообогащаемого сырья вынуждена осваивать технологии переработки упорного золотосодержащего сырья, характеризующегося тонкой дисперсией золота в сульфидных минералах, что затрудняет в дальнейшем возможность прямого цианирования продуктов обогащения. Переработка упорных золотосодержащих руд характеризуется разнообразием технологических схем, на выбор которых влияет множество факторов. Основными из которых являются, химический состав исходной руды, форма нахождения и характер распределения золота в ней, свойства сопутствующих минералов, с которыми ассоциировано золото, присутствие других компонентов, затрудняющих обогащение. Кроме того, существенно ухудшает процесс извлечения золота присутствие на его поверхности пленок и покрытий адгезионной природы.

Современный опыт переработки упорных золотосодержащих руд базируется на использовании комбинированных гравитационно-флотационных технологий с цианированием золотосодержащих концентратов [1-6].

Целью проведенных исследований является получение информации о технологических свойствах золотосодержащей руды одного месторождения Республики Казахстан и определение возможности применения гравитационно-флотационной технологии для ее переработки [7].

По химическому составу пробы руды представлен преимущественно литофильными компонентами, среди которых преобладает кремнезем. Его количество в пробе составляет 74,4%. Суммарное количество оксидов щелочных и щелочноземельных металлов в пробе составляет 10,45%. Количество углерода в пробе составляет 1,20%. Практически весь углерод входит в состав карбонатов.

Рудообразующие элементы представлены в основном железом и серой. Количество железа в пробе составляет 3,20%. Массовая доля сульфидного и окисленного железа составляет 1,63% и 1,57% соответственно. Доля серы в пробе составляет 1,65%, вся сера входит в состав сульфидов.

Единственным ценным компонентом в пробе руды одного месторождения Республики Казахстан является золото. Его содержание в пробе составляет 1,38 г/т. Содержание серебра в пробе менее 0,5 г/т.

Результаты ситового анализа пробы руды выполненного на материале крупностью -2 мм с определением содержания золота по классам крупности приведены на рисунке 1.

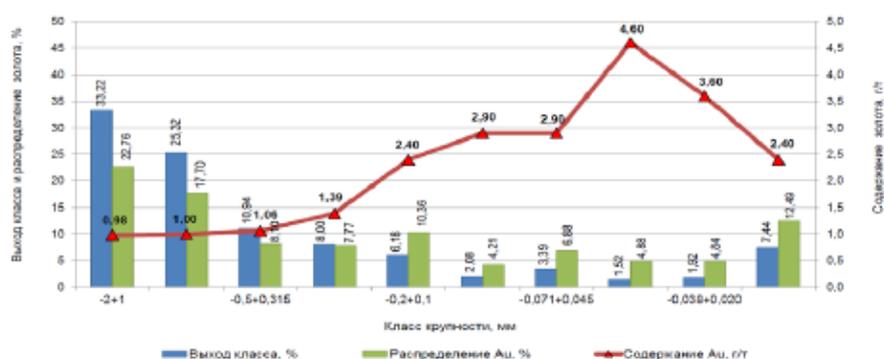


Рисунок 1 – Гранулометрическая характеристика пробы руды с распределением золота по классам крупности

По данным гранулометрической характеристики, представленной на рисунке 1, видно, что основная масса материала пробы при крупности -2 мм сосредоточена в крупных классах в интервале -2+0,5 мм – 58,53%. В других классах крупности материал пробы распределяется равномерно с незначительными вариациями выхода материала.

Содержание золота в пробе по данным гранулометрического анализа составляет 1,43 г/т с колебаниями в классах крупности от 0,98 до 4,60 г/т. Распределение металла по классам крупности неравномерное. Золото раскрывается и концентрируется в тонких классах -0,2+0 мм. Для этих классов отмечено повышение содержания золота относительно исходного содержания в пробе.

Для выяснения форм нахождения золота, характера его взаимосвязи с рудными и породообразующими минералами и оценки высвобождаемости для пробы руды месторождения выполнен фазовый анализ. Амальгамация проведена стадийно с понижением крупности материала от исходной (-2 мм) до 95% класса -0,071 мм. Результаты анализа представлены в таблице 1.

В результате фазового анализа выявлено, что доля свободного золота в пробе руды при исходной крупности -2 мм составляет 5,37%. При уменьшении крупности материала до 60% класса -0,071 мм количество свободного золота возрастает на 21,21%. Увеличение тонины помола до 95% класса -0,071 мм позволяет дополнительно высвободить еще 10,20% благородного металла. Общая доля свободного золота с чистой поверхностью при крупности руды 95% -0,071 мм составляет 36,78%. В виде открытых сростков с рудными и породообразующими минералами выявлено 43,81% металла.

В целом, по результатам фазового анализа отмечено, что проба руды месторождения является перспективным сырьем для переработки гравитационными и флотационными методами.

Таблица 1 – Результаты фазового анализа золота пробы руды

Форма золота	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
Свободное, с чистой поверхностью при круп. – 2 мм	0,08	5,37
Свободное, с чистой поверхностью при круп. P <sub>60</sub> – 71 мкм	0,31	21,21
Свободное, с чистой поверхностью при круп. P <sub>95</sub> – 71 мкм	0,15	10,20
<b>Всего свободного золота с чистой поверхностью</b>	<b>0,54</b>	<b>36,78</b>
В виде открытых сростков с рудными и породообразующими минералами	0,64	43,81
<b>Всего в плавящейся форме</b>	<b>1,18</b>	<b>80,59</b>
В кислото растворимых минералах и пленках	0,02	1,38
В сульфидах	0,21	14,35
В нерастворимых в царской водке минералах и кварце	0,05	3,68
<b>Итого</b>	<b>1,46</b>	<b>100,00</b>

#### Изучение гравитационной обогатимости

Для предварительной оценки уровня извлечения золота в гравитационный концентрат выполнялся тест на центробежном концентраторе с периодической разгрузкой.

Наработка хвостов гравитации для дальнейших исследований выполнялась обогащением измельченной навески руды на центробежном концентраторе. Хвосты гравитационного обогащения были направлены на флотационные исследования. Результаты тестирования пробы руды на центробежном концентраторе приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты тестирования руды на центробежном концентраторе

Продукт	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
Концентрат	0,35	79,90	19,23
Хвосты	99,65	1,20	80,77
Исх. руда	100,00	1,47	100,00

При обогащении на центробежном концентраторе получен концентрат с выходом 0,35% при содержании золота 79,9 г/т. Извлечение золота в концентрат составило 19,23%. При этом содержание золота в хвостах гравитационного обогащения составило 1,20 г/т.

*Исследования хвостов гравитации на обогатимость флотационными методами*

Целью исследований по флотационному обогащению являлось определение оптимального режима выполнения флотации для получения сульфидного золотосодержащего концентрата: крупность измельчения, реагентный режим, продолжительность флотации по операциям, структура флотационной схемы.

С целью определения оптимальной степени измельчения хвостов гравитационного обогащения для флотации провели серию тестов на материале крупностью 60%, 70%, 80%, и 90% -0,071 мм. В ходе тестов выполнялись операции основной и контрольной флотации. Для пробы хвостов был принят следующий реагентный режим: расход бутилового ксантогената калия (БКК) в основную флотацию – 300 г/т, в контрольную – 150 г/т. В качестве пенообразователя использовался Оксаль Т-92 при расходе 27 г/т в основную и в контрольную операции. Продолжительность флотации выбиралась визу-ально по нагруженности пенного слоя, и она составляла 3 минуты для основной операции и 10 минут – для контрольной. Схема выполнения флотации показана на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема выполнения тестов по выбору оптимальной крупности измельчения.

На рисунке 3 показана зависимость извлечения золота и эффективности его обогащения при различной крупности измельчения хвостов гравитации.

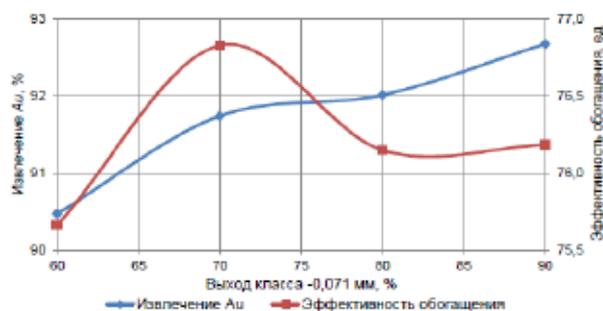


Рисунок 3 – График зависимости извлечения золота и эффективности обогащения от крупности измельчения хвостов гравитации

Из графика на рисунке 3 следует, что наибольший показатель эффективности обогащения получен при крупности измельчения 70% класса -0,071 мм. Более тонкое измельчение дает несущественный прирост извлечения

золота, который составляет всего 0,93% при этом выход черного концентрата увеличивается на 1,58%. С учетом полученных данных оптимальная крупность измельчения для флотации была выбрана 70% -0,071 мм.

Для установления оптимального расхода собирателя была проведена серия опытов по результатам которой был установлен оптимальный расход собирателя бутилового ксантогената калия, который составил в основную операции флотации 200 г/т, в контрольную 100 г/т.

#### Замкнутый цикл гравитационно-флотационного обогащения

Для установления показателей гравитационно-флотационного обогащения золотосодержащей руды одного месторождения Республики Казахстан, по отработанным режимам гравитационного и флотационного обогащения был поставлен тест с выполнением флотации в замкнутом цикле. Схема теста показана на рисунке 4.

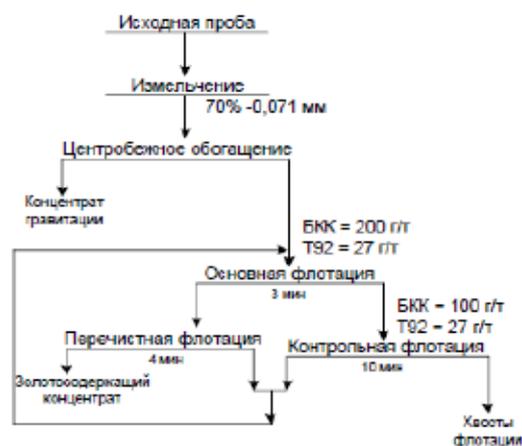


Рисунок 4 – Схема гравитационно-флотационного обогащения золотосодержащей руды одного месторождения Республики Казахстан

Результаты замкнутого теста представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты обогащения руды одного месторождения Республики Казахстан

Продукт	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
Грав. к-т	0,03	856	17,36
Флот. к-т	5,63	18,3	74,64
Сумм. к-т	5,66	22,45	92,00
Хвосты флот.	94,34	0,117	8,00
Исходная руда	100,00	1,38	100,00

В результате выполнения замкнутого теста получены следующие продукты:

- гравитационный концентрат с содержанием золота 856,0 г/т при выходе 0,028% и извлечении 17,36%;

- сульфидный концентрат флотации с содержанием золота 18,3 г/т при извлечении 74,64% и выходе 5,63%.

Суммарное извлечение золота в гравитационно-флотационный концентрат составило 92,00% при выходе 5,658% и расчетном содержании золота 22,45 г/т. Содержание золота в хвостах флотации равнялось 0,117 г/т.

В целом, в результате выполненного теста получены достаточно высокие показатели.

#### Выводы

Исследованная золотосодержащая руда является благоприятным сырьем для гравитационно-флотационного обогащения. Для флотационного обогащения хвостов гравитации установлены следующие оптимальные условия выполнения:

- крупность измельчения составляет 70% -0,071 мм;

- расход бутилового ксантогената калия в основную флотацию составляет 200 г/т, в контрольную – 100 г/т;

- оптимальное содержание твердого в пульпе - 27-35%;

- продолжительность основной операции 3 мин, контрольной – 10 мин.

В замкнутом тесте по гравитационно-флотационному обогащению руды по разработанной схеме, включающей основную, контрольную и перечистную операции, при крупности измельчения руды 70% -0,071 мм извлечение золота в гравитационно-флотационный концентрат составило 92,00% при выходе 5,658% и расчетном содержании золота 22,45 г/т. Содержание золота в хвостах флотации равнялось 0,117 г/т.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Kenzhaliyev, B. K. Research and development of gold ore processing technology / B. K. Kenzhaliyev, A. K. Koizhanova, O. V. Atanova, D. R. Magomedov, H. Nurdin // *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources* - (<https://doi.org/10.31643/2024/6445.17>)
- 2 Koyzhanova, A. K. Development of a combined processing technology for low-sulfide gold-bearing ores / A. K. Koyzhanova, B. K. Kenzhaliyev, D. R. Magomedov, N. N. Abdyldaev // *Obogashchenie Rud* - (<https://doi.org/10.17580/or.2021.02.01>)
- 3 Fedotov, P. K. Technology for processing low-sulfide gold-quartz ore / P. K. Fedotov, A. E. Senchenko, K. V. Fedotov, A. E. Burdonov, V. E. Vlasova // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. geoaktivny inzhenerii = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* - (<https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3540>)
- 4 Barmenshinova, M. B. Study of the material composition of refractory gold-bearing ore from the Aktobe deposit / M. B. Barmenshinova, I. Yu. Motovilov, Sh. A. Telkov, R. S. Omar // *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources*. - (<https://doi.org/10.31643/2024/6445.34>)
- 5 Штреслер, К. А. Повышение инвестиционного потенциала месторождений руд цветных металлов и золота предварительным обогащением / К. А. Штреслер, Ж. В. Миронова, А. В. Конев, С. П. Киселева // *Записки Горного института*. -2013. №284. -С. 270–276.
- 6 Леонов, С. Б. Исследование полезных ископаемых на обогатимость: учеб. пособие / С. Б. Леонов, О. Н. Белькова - Москва: Интернет Инжиниринг, 2001. – 631 с.

УДК 622.7

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

А.Р. Хасенов, Ш.А. Телков, П.Ю. Мотовилов  
*Satbayev University, г. Алматы, Казахстан*

Конечная крупность руды, поступающей на обогащение, определяется размером вкрапленности минералов, содержащих ценные компоненты, и избранным методом обогащения. Перед обогащением руда подвергается дроблению и измельчению до таких размеров, при которых ценные компоненты будут находиться в свободном состоянии и могут быть отделены от минералов пустой породы. Чем полнее раскрыты зерна полезных минералов, тем эффективнее последующее обогащение этой руды [1].

Измельчение полезных ископаемых является важнейшим этапом подготовки руд перед последующим обогащением. Затраты электроэнергии горно-обогатительных комбинатов на этот процесс составляют 5-20% от потребляемой электроэнергии в мире. Поэтому вопросы совершенствования данного процесса всегда остаются актуальными для научно-исследовательских работ и изысканий.

Стандартная рудоподготовка руд цветных металлов после дробления осуществляется в двух- или трехстадиальных схемах с применением шаровых мельниц в открытом и замкнутом циклах. В последние 20 лет преимущественным интересом среди измельчительного оборудования пользуются мельницы полу- и самозмельчения.

Среди направлений развития техники и технологии измельчительного процесса отмечают следующие: увеличение объемов мельниц, что позволяет на такой же производственной площади установить более производительное оборудование; оптимизация конструкции установленных мельниц позволила без особых затрат незначительно увеличить выход готового класса; совершенствование технологии процесса и режима измельчения. Последнее направление обладает значительными преимуществами: используется оборудование, которое уже установлено на предприятии. В случае, если требуется дополнительное оборудование, то, как правило, затраты на его установку окупаются за достаточно небольшой срок.

Из наиболее перспективных направлений совершенствования процесса измельчения можно отметить поиск принципиально нового, более эффективного процесса разрушения, которое может быть внедрено на существующем оборудовании с небольшой его модернизацией и минимальными затратами.

Кроме колоссальных объемов потребления электроэнергии, на процессы измельчения приходится более 50% капитальных и эксплуатационных затрат горно-рудных предприятий. В стремлении увеличить объемы производства и уменьшить тонину помола, большее внимание уделялось количеству мельниц, которые отличаются большой металлоемкостью, рабочий объем которых несоизмерим с удельной производительностью, эффективностью и занимаемой площадью производственных помещений.

Отдельным пунктом расхода является использование измельчительной среды (шары, стержни) и футеровки. Удельная производительность по готовому классу зависит от вещественного состава перерабатываемого сырья, состава шаровой загрузки, объема мельницы и требуемой крупности измельчения по готовому классу. Исследованиями установлено, что производительность шаровых мельниц в большей степени зависит от количества шаровой загрузки и ее качества. Недостаток шаров и неправильно подобранная их крупность снижают удельную производительность мельниц [2-6].

В связи с вышеперечисленными причинами, актуальность приобретают вопросы совершенствования технологии измельчения на существующем оборудовании.

**ОТЗЫВ  
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на магистерскую диссертацию  
Базар Ерасыл Нурабдуллаұлы

по специальности 7M07226 – Обогащение полезных ископаемых

на тему: «Отработка технологии наработки флотационного концентрата на полупромышленной установке из первичной руды месторождения «Пустынное»»

В магистерской диссертации в достаточном объеме выполнен анализ существующих технологий переработки золотосодержащих руд в странах ближнего и дальнего зарубежья. На основании литературного обзора выполнена грамотная постановка задач исследований.

В работе выполнены в необходимом объеме исследования вещественного состава с применением минералогических, химических, пробирных, фазовых анализов. Основываясь на полученных данных по изучению вещественного состава проведены тесты по отработке гравитационного и флотационного обогащения.

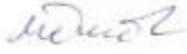
Выполнены схемные опыты по разработанной комбинированной гравитационно-флотационной технологии переработки золотосодержащей руды месторождения «Пустынное».

Смонтирована полупромышленная установка. Полученные результаты на полупромышленной установке свидетельствуют о высокой эффективности технологии флотации руды месторождения "Пустынное". Пилотная полупромышленная установка флотационного обогащения может быть использована для проверки новых реагентных режимов, также для наработки флотационных концентратов их гидрометаллургической переработки при опережающем опробовании с целью получения технологических показателей, которые будут способствовать принятию решений по внедрению измененный реагентного режима в фабричную схему.

Все вопросы, поставленные в магистерской диссертации, решены с достаточной полнотой и на основании этого магистерскую диссертацию можно считать законченной научно-исследовательской работой.

Основные результаты работы опубликованы в научных журналах.

Таким образом, по совокупности признаков магистерская диссертация магистранта Базар Ерасыл Нурабдуллаұлы соответствует предъявляемым требованиям, а автор заслуживает оценки «отлично» - 95 % и присуждения ему ученой степени магистра по специальности 7M07226 – Обогащение полезных ископаемых.

Научный руководитель  
Доктор PhD, ассоциированный профессор  И.Ю. Мотовилов

«10» 06 2024 г.

## РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию  
Базара Ерасыла Нұрабдуллаұлы  
по специальности 7М07226 – Обогащение полезных ископаемых  
на тему: «Отработка технологии наработки флотационного концентрата на  
полупромышленной установке из первичной руды месторождения  
«Пустынное»»

Выполнено:

- а) графическая часть на 49 листах
- б) пояснительная записка на 61 страницах

### ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ:

Магистерская диссертация представлена лабораторными исследованиями флотационной обогатимости золотосодержащей первичной руды месторождения «Пустынное» с проверкой отработанных режимов флотации на полупромышленной флотационной установке.

На основании выполненного литературного обзора были грамотно поставлены задачи для достижения цели исследования магистерской диссертации.

Выполненные лабораторные исследования подтверждают, что технология флотационного обогащения руды месторождения "Пустынное" является эффективным и перспективным методом обогащения первичной руды.

Полученные результаты на полупромышленной установке свидетельствуют о высокой эффективности технологии флотации руды месторождения "Пустынное", что подтверждает возможность успешного применения данной технологии в промышленных масштабах. Пилотная полупромышленная установка флотационного обогащения может быть использована для проверки новых реагентных режимов, также для наработки флотационных концентратов их гидрометаллургической переработки при опережающем опробовании с целью получения технологических показателей, которые будут способствовать принятию решений по внедрению изменений реагентного режима в фабричную схему.

Результаты диссертации были опубликованы в материалах международной научно-практической конференции "Сатпаевские чтения - 2024. Наука и технологии: Ресурсосберегающие технологии в минерально-индустриальном мегакомплексе в условиях устойчивого развития экономики", прошедшей в г. Алматы. Тема доклада "Исследование гравитационно – флотационной обогатимости золотосодержащей руды".

### ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

К магистерской диссертации имеется ряд замечаний:

- 1) Пилотную полупромышленную установку рекомендуется дополнить лабораторным центробежным концентратором.

### ОЦЕНКА РАБОТЫ

Проведенные исследования в представленной на рецензию магистерской диссертации сравнимы с хорошими достижениями в области переработки золотосодержащего сырья, предъявляемыми к данному виду научно-исследовательских работ. Исследования проведены на достаточно высоком уровне, заслуживают оценки отлично (95 баллов) и присвоения автору – Базара Е.Н. степени магистра по специальности 7М07226 – «Обогащение полезных ископаемых».

Рецензент



Кучербаев Бауыржан Расымжанович

Занимаемая должность: Заместитель начальника производственного технического отдела ГОК «Пустынное», магистр технических наук.

« 10 » 06 2024 г.